



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**FERRAMENTA PARA CONVERSÃO E INTEGRAÇÃO
AUTOMÁTICA DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA COM O SOFTWARE OPENDSS.**

Tiago Scapin

Lajeado, dezembro de 2018

Tiago Scapin

**FERRAMENTA PARA CONVERSÃO E INTEGRAÇÃO AUTOMÁTICA
DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM O SOFTWARE OPENDSS.**

Monografia apresentada ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência, Redes de Distribuição de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Augusto Simon

Lajeado, dezembro de 2018

Tiago Scapin

**FERRAMENTA PARA CONVERSÃO E INTEGRAÇÃO AUTOMÁTICA
DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM O SOFTWARE OPENDSS.**

A banca examinadora aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica:

Prof. Me. Augusto Simon – Orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Anderson Antônio Giacomolli
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Dr. Juliano Schirmbeck
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, 10 de dezembro de 2018

RESUMO

Um dos principais estudos necessários à operação de sistemas de distribuição de energia elétrica é a análise do fluxo de potência. Essa análise é complexa, tendo-se em vista a magnitude desses sistemas. Faz-se assim necessário o uso de softwares adequados para o modelamento das redes de distribuição que calculam o fluxo de potência e outras análises relevantes. Existem atualmente diferentes opções de softwares para o cálculo do fluxo de potência de redes de distribuição. Entretanto, os modelos resultantes não são compatíveis entre si, o que prejudica o intercâmbio de informações entre os agentes de distribuição de energia sobre os seus diferentes sistemas e demais interessados. Este trabalho aborda o problema da falta de compatibilidade entre os modelos de redes de distribuição gerados por diferentes ferramentas de software. Elegendo a ferramenta de análise MATPOWER, que se destaca pelo tamanho de sua comunidade de usuários, este trabalho tem como proposta o desenvolvimento de um sistema computacional capaz de converter redes elétricas modeladas a partir do MATPOWER para o modelo do sistema de código aberto OpenDSS. Ao final, para validação da ferramenta, foi analisado o resultado da resolução do fluxo de potência na rede original em comparação com o fluxo de potência da rede recriada com o algoritmo e executado no software OpenDSS. Nestas análises foram possíveis verificar que as redes convergem no mesmo número de interações, a tensão das barras divergiu em uma média de 0,2% em relação a rede original e o fluxo de potência em uma média de 4,2% inferior a rede original. Considerando estes valores dentro de limites aceitáveis e suficientemente precisos, a conversão de redes elétricas foi executada e validada com êxito através do desenvolvimento desta ferramenta.

Palavras-chave: Fluxo de potência, distribuição de energia elétrica, OpenDSS MATPOWER.

ABSTRACT

One of the main studies required for the operation of electric power distribution systems is power flow analysis. This analysis is complex, given the magnitude of these systems. It is therefore necessary to use suitable software for the modeling of distribution networks that calculate power flow and other relevant analyzes. There are currently different software options for calculating the power flow of distribution networks. However, the resulting models are not compatible with each other, which impairs the exchange of information between the energy distribution agents on their different systems and other stakeholders. This work addresses the problem of the lack of compatibility between the distribution network models generated by different software tools. By choosing the MATPOWER analysis tool, which stands out for the size of its user community, this work proposes the development of a computational system capable of converting electrical networks modeled from MATPOWER to the OpenDSS open source system model. At the end, for the validation of the tool, the result of the resolution of the power flow in the original network was analyzed in comparison with the power flow of the network recreated with the algorithm and executed in the OpenDSS software. In these analyzes it was possible to verify that the networks converge in the same number of interactions, the voltage of the bars diverged in an average of 0.2% in relation to the original network and the flow of power in an average of 4.2% inferior to the original network. Considering these values within acceptable and sufficiently precise limits, the conversion of electrical networks was executed and validated successfully through the development of this tool.

Keywords: Power flow, Energy distribution, OpenDSS, MATPOWER.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de sistema elétrico	17
Figura 2 - Modelo π	18
Figura 3 - Modelo de linhas curtas	19
Figura 4 - Modelo de linhas médias	20
Figura 5 - Modelo de linhas longas	21
Figura 6 - Modelo exato transformador monofásico refletido ao primário	25
Figura 7 - Modelo aproximado de transformador refletido ao primário.....	25
Figura 8 - Diagrama fasorial de polos lisos	28
Figura 9 - Diagrama fasorial de polos salientes	29
Figura 10 - Fluxograma de Newton-Raphson.....	36
Figura 11 - Rede exemplo MATPOWER.....	38
Figura 12 - Processo de geração do Circuit	47
Figura 13 - Processo de geração do Transformer e Line	48
Figura 14 - Processo de geração do Load e Capacitor	49
Figura 15 - Processo de geração do Generator	50
Figura 16 - Fluxograma de execução da ferramenta.....	51
Figura 17 - Fluxograma de conversão e teste	53
Figura 18 - Tela inicial da ferramenta.....	54
Figura 19 - Tela alerta de solicitação da rede no padrão	55
Figura 20 - Conversão rede 33 barras em barramento infinito	56
Figura 21 - Arquivo “.zip” rede 33 barras convertido	56
Figura 22 - Exemplo de tela rede não padrão MATPOWER	57
Figura 23 - Parcial do arquivo de saída MATPOWER.....	59
Figura 24 - Sumário do fluxo de potência OpenDSS rede 33 barras	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação de potência absorvida em função da tensão	24
Gráfico 2 - Magnitude das tensões das barras.....	60
Gráfico 3 - Divergência percentual da magnitude da rede convertida.....	60
Gráfico 4 - Fase das tensões das barras	61
Gráfico 5 - Divergência percentual da fase da rede convertida em relação a rede original.....	62
Gráfico 6 - Fluxo de potência ativa terminal 1	63
Gráfico 7 - Fluxo de potência reativa terminal 1	63
Gráfico 8 - Divergência percentual do fluxo de potência do terminal 1 da rede convertida em relação a rede original	63
Gráfico 9 - Fluxo de potência ativa terminal 2	64
Gráfico 10 - Fluxo de potência reativa terminal 2	64
Gráfico 11 - Divergência percentual do fluxo de potência do terminal 2 da rede convertida em relação a rede original	65
Gráfico 12 - Divergência percentual de perdas de potência da rede convertida em relação a rede original.....	66
Gráfico 13 - Perdas ativas e reativas acumuladas no sistema.....	67
Gráfico 14 - Divergência percentual de perdas de potência acumulada da rede convertida em relação a rede original	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das linhas	19
Tabela 2 - Perdas ativas e reativas dos circuitos	66

LISTA DE ABREVIações

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
EPRI	Electric Power Research Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
JNI	Java Native Interface
MPC	MATPOWER Case
OpenDSS	The Open Distribution System Simulator
P	Potência ativa
PC	Power Conversion
PD	Power Delivery
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
Q	Potência reativa
RT	Relação de Transformação
S	Potência aparente
S _b	Potência Base
SIN	Sistema Interligado Nacional
V	Tensão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Objetivos gerais	11
1.2. Objetivos específicos	13
1.3. Justificativa do trabalho	13
1.4. Disciplinas relacionadas	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1. Valores percentuais e por unidade.....	14
2.2. Modelos de elementos de sistemas elétricos.....	16
2.2.1. Barras	16
2.2.2. Linhas	18
2.2.3. Cargas	22
2.2.4. Transformadores	25
2.2.5. Geradores.....	27
2.2.6. Capacitores	30
2.3. Matriz de admitância	30
2.4. Fluxo de potência.....	32
2.4.1. Método Gauss-Seidel	33
2.4.2. Método Newton-Raphson	35
2.5. Modelagem para o MATPOWER.....	37
2.5.1. Formato de dados.....	37
2.5.2. Branch – Branches (Ramificações)	38
2.5.3. Gen – Generators (Geradores).....	39
2.5.4. Loads (Cargas)	39
2.5.5. Shunt	39
2.6. Modelagem para o OpenDSS	39
2.6.1. Circuit	40
2.6.2. Line.....	41
2.6.3. Transformer	42
2.6.4. Load.....	43
2.6.5. Capacitor	43
3. METODOLOGIA	44
3.1. Etapa 1 – Fundamentação teórica	44

3.2.	Etapa 2 – Conversão de modelos	45
3.3.	Etapa 3 – Algoritmos para conversão do modelo	47
3.4.	Etapa 4 – Criação do sistema DumpDSS	50
3.5.	Etapa 5 – Testes de conversão	53
4.	RESULTADOS E VALIDAÇÕES.....	54
4.1.	Utilizando o DumpDSS	54
4.2.	Conversão rede 33 Barras IEEE.....	58
4.3.	Fluxo de potência.....	58
4.4.	Análise de tensões das barras.....	60
4.5.	Análise do fluxo de potência nas linhas	62
4.6.	Análise das perdas de potência.....	65
5.	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICE A – ARQUIVOS GERADOS REDE 33 BARRAS	71
	Arquivo “.dss”	71
	Arquivo “.txt”	75
	APÊNDICE B – ARQUIVOS DE SAÍDA REDE 33 BARRAS	76
	Arquivo de saída do MATPOWER.....	76
	Arquivo de saída do OpenDSS - TENSÕES	79
	Arquivo de saída do OpenDSS - POTÊNCIAS	81
	Arquivo de saída do OpenDSS - PERDAS	84
	ANEXO A – FORMATO DE DADOS MATPOWER.....	85
	ANEXO B – REDE 33 BARRAS MATPOWER.....	88

1. INTRODUÇÃO

O planejamento e a operação de sistemas elétricos de potência têm como finalidade atender ao contínuo crescimento da demanda de carga assim como suas variações diárias e sazonais. (ZANETTA JÚNIOR, 2005).

Pode-se considerar como pertencentes aos sistemas elétricos de potência as indústrias de grande porte, as distribuidoras regionais de energia elétrica e todo Sistema Interligado Nacional (SIN). Manter esse sistema estável e confiável requer vários estudos contínuos e detalhados com previsões de ampliações, reforços e instalações de novos equipamentos em linhas de transmissão e distribuição, subestações e geração de energia.

Um dos principais desses estudos é o fluxo de potência. Ele é utilizado para analisar sobrecargas no sistema, projetos de novas linhas de transmissão e distribuição, perdas nas linhas, desvios de potência, entre outros. A sua resolução é matematicamente complexa devido à grande dimensão do sistema elétrico, com sua infinidade de barras nas quais as linhas se conectam, exigindo uma matriz com muitos argumentos a serem calculados.

Deste modo, os agentes de energia envolvidos utilizam ferramentas computacionais para resolver o fluxo de potência. Existem diversas ferramentas no mercado que oferecem modelos que não são compatíveis entre si, o que prejudica o intercâmbio de informações sobre os sistemas de potência entre os agentes e demais interessados. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2015 haviam 63 concessionárias, 38 Permissionárias e 13 Autorizadas, totalizando 114 agentes atuando no mercado de distribuição. Tratando do problema da falta de compatibilidade entre os modelos de sistemas de potência gerados por diferentes ferramentas de software, este trabalho elege as redes de distribuição como contexto e a ferramenta MATPOWER por sua relevância no mercado. O seu objetivo consiste no desenvolvimento de um sistema computacional capaz de converter redes elétricas modeladas a partir do MATPOWER para um modelo genérico do sistema de código aberto OpenDSS.

1.1. Objetivos gerais

As análises de fluxo de potência são necessárias para manter um bom equilíbrio no sistema elétrico. Ele é utilizado para analisar sobrecargas no

sistema, projetos de novas linhas de transmissão e distribuição, estudos de perdas nas linhas, desvios de potência.

A resolução do fluxo de potência é matematicamente complexa devido à grande dimensão do sistema elétrico, além da grande extensão métrica, temos milhares de *barras* nas quais as linhas se conectam exigindo uma matriz com muitos argumentos para serem calculados. Deste modo os agentes de distribuição de energia possuem suas redes elétricas modeladas em softwares autônomos que resolvem fluxo de potência. Em Geral estes softwares são comerciais, de alto valor econômico e de difícil integração com outros softwares. Cabe observar que existem versões acadêmicas de alguns desenvolvedores que fornecem licenças gratuitas, como o software ANAREDE¹, porém há limitações no número de barras. Outros como o MATPOWER com licenças gratuitas, porém há necessidade de uma licença de Matlab para executar. Esta limitação dificulta a integração e o desenvolvimento de estudos de otimização das redes.

Uma ótima ferramenta para este estudo é o *The Open Distribution System Simulator* – OpenDSS. Ele foi desenvolvido pela empresa *Electric Power Research Institute - EPRI* com o objetivo de criar uma ferramenta que fosse possível modelar circuitos de distribuição de energia elétrica em uma linguagem de programação orientada a objetos, deste modo o trabalho de modelagens em complexas linguagens da época seria reduzido. O OpenDSS é um software livre e por este motivo pode ser utilizado e modificado por qualquer usuário sem gerar ônus ou qualquer obrigação legal com o desenvolvedor.

Recentemente, através de nota técnica, a ANEEL propôs o aprimoramento da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7 do PRODIST² que se aplica as distribuidoras de serviço público de energia. Essa proposta trata da alteração do cálculo das perdas técnicas através do fluxo de potência, abandonando os modelos simplificados para a aplicação de métodos detalhados e utilizando o OpenDSS como ferramenta padrão.

¹ Programa computacional para análise de sistemas elétricos de potência. <http://www.cepel.br/produtos/anarede-analise-de-redes-eletricas.htm>

² Procedimentos de Distribuição - PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Devido à complexidade em modelar as redes elétricas, este trabalho propõe o desenvolvimento de um algoritmo que seja capaz de transferir os dados das redes elétricas reais de empresas e agentes modeladas a partir do MATPOWER para um modelo equivalente ao do sistema OpenDSS sem ser necessário a remodelação manual.

1.2. Objetivos específicos

Modelar redes elétricas no OpenDSS;

Desenvolver um algoritmo capaz de converter redes reais do sistema padrão MATPOWER para o sistema OpenDSS;

Validar a rede gerada pelo algoritmo.

1.3. Justificativa do trabalho

Devido à grande dimensão dos sistemas de distribuição temos redes elétricas de alta complexidade que tornam a modelagem severamente trabalhosa. Juntamente, a grande parte dos softwares que resolvem fluxo de potência possuem um alto valor comercial. Com este algoritmo temos uma rápida conversão para a ferramenta OpenDSS podendo assim ser simulado e analisado com maior agilidade e gratuitamente.

1.4. Disciplinas relacionadas

Como base teórica para este trabalho são usados os conhecimentos adquiridos nas disciplinas:

- ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA;
- PLANEJAMENTO, OPERAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA;
- PROTEÇÃO E ESTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS;
- DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
- SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
- TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA;
- ANÁLISE E PROJETO DE SUBESTAÇÕES;
- ALGORITMOS E PROGRAMAÇÃO;
- MÁQUINAS ELÉTRICAS I;
- MÁQUINAS ELÉTRICAS II.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os temas valores por unidade, modelos do sistema elétrico de potência, matriz de admitância, métodos de fluxo de potência, modelos do MATPOWER e modelos do OpenDSS. As seções 2.1 a 2.4 apresentarão o detalhamento dos temas baseados na literatura de LEMOS (2008), MONTICELLI (2011), MOURA (2013), PAIVA (2011), PINTO (2014), ROBBA (2000) e ZANETTA JÚNIOR (2003 e 2005).

2.1. Valores percentuais e por unidade

Os valores percentuais e valores por unidade, normalmente chamados de *pu* corresponde a uma escala de grandeza referenciada a alguma grandeza do sistema elétrico como, tensão, corrente, impedância e potência. A escala em *pu* é utilizada para facilitar os cálculos de sistemas elétricos, principalmente quando há transformadores.

Para relacionar as grandezas do sistema elétrico dispomos de duas relações físicas:

$$V = Z * I \quad (1)$$

$$S = Z * I \quad (2)$$

Como premissa, definimos uma Potência Base (S_{base}) e uma Tensão Base (V_{base}) em que o sistema será referenciado. A S_{base} será sempre a mesma para todo sistema, já a V_{base} dependerá da relação de transformação (RT) dos transformadores entre as barras.

Através destes valores fixados e das relações físicas podemos obter todas tensões e potências com uma relação percentual ou fracionária (*pu*) da base.

$$V_{base} = V \quad \text{e} \quad S_{base} = S \quad (3)$$

Deste modo, qualquer tensão pode ser expressa por:

$$v\% = \frac{V}{V_{base}} * 100 \quad (4)$$

$$v = \frac{V}{V_{base}} pu \quad (5)$$

Analogamente, para qualquer potência:

$$s\% = \frac{S}{S_{base}} * 100 \quad (6)$$

$$s = \frac{S}{S_{base}} pu \quad (7)$$

Para corrente e impedância utilizamos as equações (1) e (2):

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad (8)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (9)$$

Analogamente, qualquer corrente e impedância será expressa por:

$$z = \frac{Z}{Z_{base}} = Z * \frac{S_{base}}{V_{base}^2} pu \quad (10)$$

$$i = \frac{I}{I_{base}} = I * \frac{V_{base}}{S_{base}} pu \quad (11)$$

Nos sistemas reais, geralmente conhecemos o valor de uma grandeza em pu numa determinada base e precisamos saber este valor em outra base. Para isso usamos o procedimento de Mudança de Base. Ele consiste em multiplicar o valor pu pela base que foi dada e dividir pela nova base, assim temos:

Tensão:

$$v' = \frac{V}{V'_{base}} = v * \frac{V_{base}}{V'_{base}} \quad (12)$$

Corrente:

$$i' = \frac{I}{I'_{base}} = i * \frac{S_{base}}{V_{base}} * \frac{V'_{base}}{S'_{base}} = i * \frac{V'_{base}}{V_{base}} * \frac{S_{base}}{S'_{base}} \quad (13)$$

Potência:

$$p' = \frac{P}{S'_{base}} = p * \frac{S_{base}}{S'_{base}} \quad (14)$$

$$q' = \frac{Q}{S'_{base}} = q * \frac{S_{base}}{S'_{base}} \quad (15)$$

$$s' = \frac{S}{S'_{base}} = s * \frac{S_{base}}{S'_{base}} \quad (16)$$

Impedância:

$$z' = \frac{Z}{Z'_{base}} = z * \frac{V_{base}^2}{S_{base}} * \frac{S'_{base}}{V'^2_{base}} = z * \frac{S'_{base}}{S_{base}} * \left(\frac{V_{base}}{V'_{base}} \right)^2 \quad (17)$$

2.2. Modelos de elementos de sistemas elétricos

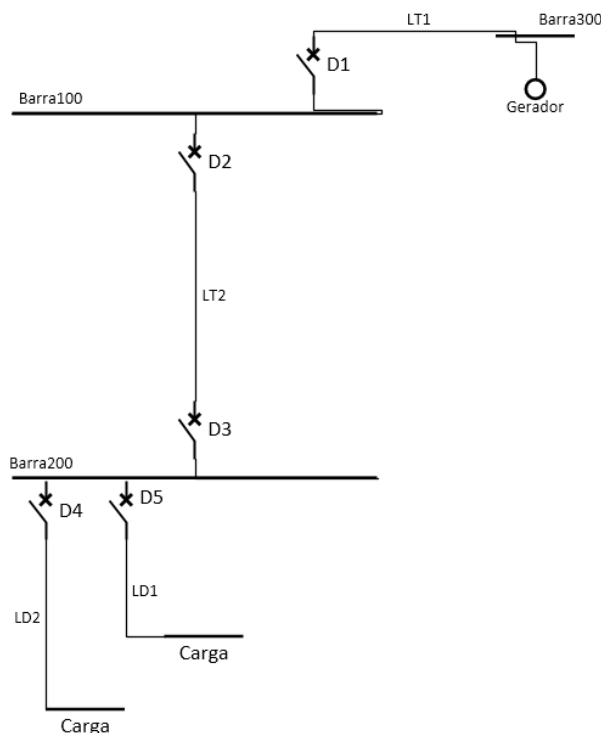
Nesta seção são apresentados os conceitos e modelos matemáticos dos principais elementos do sistema elétrico de potência.

2.2.1. Barras

Em geral, o estudo de fluxo de potência utiliza o modelo da rede elétrica chamado barra-linha. As barras são consideradas os nós da rede elétrica e as linhas ou transformadores são os elos entre os nós. A figura 1 apresenta um exemplo de sistema elétrico tradicional.

As barras consistem de condutores com resistência desprezível em comparação as impedâncias das linhas e dos transformadores. Deste modo podemos considerar uma única tensão em todo condutor.

Figura 1 - Modelo de sistema elétrico



Fonte: Do autor

As barras em geral localizam-se em subestações e podem ser compostas por vários condutores interligados através de seccionadoras e disjuntores.

Para todas as barras do sistema são associadas quatro variáveis, módulo de tensão, ângulo de tensão, potência ativa e potência reativa. Destas quatro variáveis apenas duas delas conhecemos e através do fluxo de potência obtemos as outras duas.

No estudo de fluxo de potência temos três modelos de barras, são elas:

Barra de carga: A barra de carga tem como notação Barra PQ. Nesta barra conhecemos os valores de potência ativa (P) e potência reativa (Q). Através da resolução do fluxo de potência vamos obter a tensão (V) e ângulo (θ).

Barra de geração: A barra de geração tem como notação Barra PV. Nela conhecemos os valores de potência ativa (P) e a tensão (V). Como incógnitas vamos obter potência reativa (Q) e o ângulo (θ).

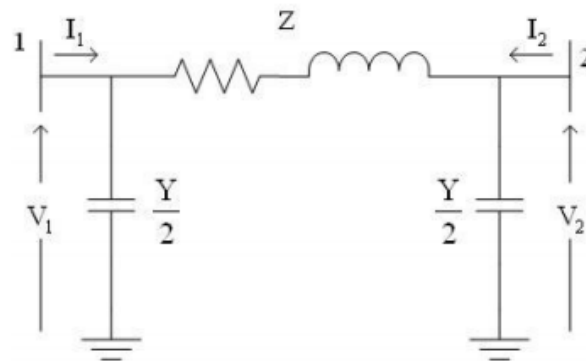
Barra slack: Esta barra também é conhecida como barra *swing* ou de referência. Temos como parâmetros a tensão (V) e o ângulo (θ). Como resultado final vamos obter as potências ativa (P) e reativa (Q).

2.2.2. Linhas

As linhas de transmissão de energia são condutores que tem a finalidade de transportar energia elétrica das unidades geradoras para os sistemas de distribuição.

Para o estudo de fluxo de potência são utilizados modelos matemáticos com as propriedades de resistência, indutância, capacitância e condutância da linha. Normalmente os problemas são representados no modelo π . Nesse modelo a linha, a impedância série e as admitâncias *shunt* estão entre as barras, conforme figura 2.

Figura 2 - Modelo π



Fonte: LEMOS, 2008

O modelo π é o modelo mais utilizado para representar o sistema (MONTICELLI, 2011), nele os comportamentos indutivo e resistivo estão associados em Z , que representa a impedância total da linha. Já o comportamento capacitivo está associado em Y , que representa a admitância total da linha. Estes parâmetros resultam das propriedades da linha pela sua extensão.

$$Z = (r * j\omega l) * d \quad (18)$$

$$Y = j\omega c * d \quad (19)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (20)$$

Onde f é a frequência em Hertz, r é a resistência por unidade de comprimento (Ω/km), l é a indutância por unidade de comprimento (H/km), c é a capacitância por unidade de comprimento (F/km) e d é o comprimento (km).

As linhas são classificadas em três modelos. Curtas, médias e longas conforme tabela 1.

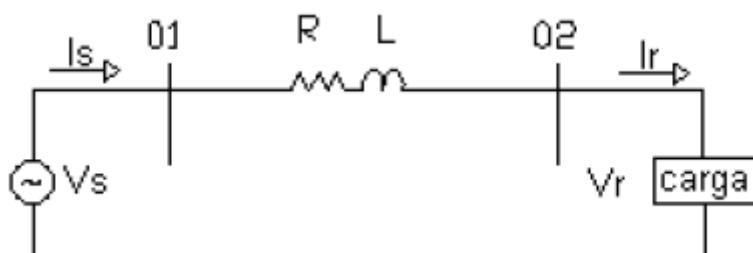
Tabela 1 - Classificação das linhas

Tipo de linha	Tensão da Linha	Comprimento da linha
Curta	$V < 150\text{kV}$	80km
	$150\text{kV} < V < 400\text{kV}$	40km
	$V > 400\text{kV}$	20km
Média	$V < 150\text{kV}$	$80\text{km} < L < 200\text{km}$
	$150\text{kV} < V < 400\text{kV}$	$40\text{km} < L < 200\text{km}$
	$V > 400\text{kV}$	$20\text{km} < L < 100\text{km}$
Longa	Restante dos casos	

Fonte: Do autor

Para as linhas curtas podemos desprezar as capacitâncias para o terra, ficando apenas com o modelo de uma impedância em série.

Figura 3 - Modelo de linhas curtas



Fonte: Do autor

$$Z = R + jX_L \quad (21)$$

$$\dot{I}_S = \dot{I}_L \quad (22)$$

$$\dot{V}_S = \dot{V}_R + Z \cdot \dot{I}_R \quad (23)$$

Quadripólo equivalente:

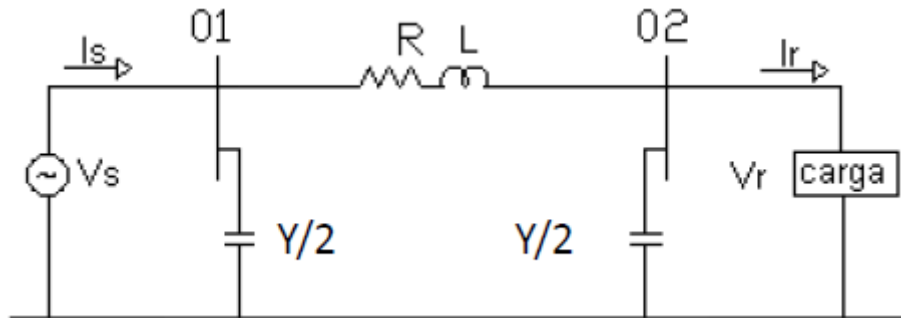
$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} V_s &= A \cdot V_r + B \cdot I_r \\ I_s &= C \cdot V_r + D \cdot I_r \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} A &= D = 1 \\ B &= Z(\Omega) \\ C &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

As linhas médias normalmente são representadas pelo modelo π demonstrado na figura 4. Este modelo vai nos trazer relações mais simplificadas para resolução do fluxo e terá uma boa precisão.

Figura 4 - Modelo de linhas médias



Fonte: Do autor

$$I_s = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4}\right) \cdot Y \cdot \dot{V}_R + \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot \dot{I}_R \quad (27)$$

$$\dot{V}_S = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot \dot{V}_R + Z \cdot \dot{I}_R \quad (28)$$

Quadripólo equivalente:

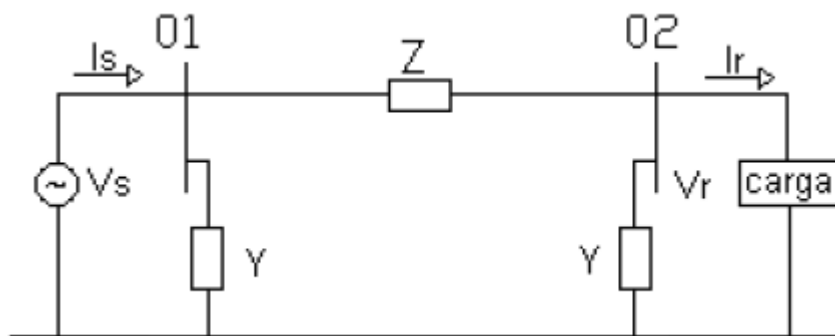
$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} V_s &= A \cdot V_r + B \cdot I_r \\ I_s &= C \cdot V_r + D \cdot I_r \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} A &= D = 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \\ B &= Z(\Omega) \\ C &= Y \cdot \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4}\right) \end{aligned} \quad (31)$$

As linhas longas geralmente são representadas pelo modelo exato, nele fornecemos os parâmetros indutivos e capacitivos exato, sem aproximações.

Figura 5 - Modelo de linhas longas



Fonte: Do autor

$$Z_{eq} = Z \cdot \frac{\sinh(\gamma \cdot L)}{\gamma \cdot L} (\Omega) \quad (32)$$

$$Y_{eq} = Y \cdot \frac{\tanh(\gamma \cdot L/2)}{\gamma \cdot L/2} (S) \quad (33)$$

Quadripólo equivalente:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} V_s &= A \cdot V_r + B \cdot I_r \\ I_s &= C \cdot V_r + D \cdot I_r \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} A &= D = \cosh \gamma \cdot L \\ B &= Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \text{ } (\Omega) \\ C &= \frac{\sinh(\gamma \cdot L)}{Z_c} \text{ } (S) \end{aligned} \quad (36)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

Impedância característica

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y}$$

Constante de propagação

2.2.3. Cargas

As cargas associadas ao nosso sistema elétrico, tanto equilibradas como desequilibradas, são representadas por um conjunto de impedâncias complexas constantes.

A potência absorvida por uma carga vai depender da sua natureza e ela pode variar em função das tensões nela aplicada. Isto é, as variações da carga em questões resistivas, capacitivas e indutivas vão alterar essa potência.

Essa relação pode ser descrita por:

$$P_f = f_1(V_f) \quad ; \quad Q_f = f_2(V_f) \quad (37)$$

Onde: P_f equivale a potência ativa absorvida pela carga por fase;

Q_f equivale a potência reativa absorvida pela carga por fase;

V_f é a tensão de fase aplicada a carga;

$f_1(V_f)$, $f_2(V_f)$ são funções que relacionam as potências ativas e reativas em função da tensão aplicada.

Dentre os vários modelos para representação do comportamento das cargas no sistema destacam-se:

Cargas de potência constante com a tensão: Nesta representação as potências ativas e reativas permanecem constantes, o mesmo dos seus valores nominais. Deste modo a corrente absorvida pela carga com uma tensão qualquer é obtida conforme equação 40.

$$\vec{S}_{NF} = P_{NF} + jQ_{NF} = S_{NF} \angle \varphi \quad (38)$$

$$\vec{V}_F = V_F \angle \theta_1 \quad (39)$$

$$\vec{I}_F = \frac{\vec{S}_{NF}^*}{V_F^*} = \frac{S_{NF} \angle -\varphi_1}{V_F \angle -\theta_1} = \frac{S_{NF} \angle -\varphi_1 + \theta_1}{V_F} \quad (40)$$

Cargas de corrente constante com a tensão: nesta representação o módulo da corrente absorvida e o fasor de potência permanecem constantes. Para obter esses valores necessitamos da potência ativa e reativa absorvida pela carga ao ser alimentada com a tensão nominal. Matematicamente temos:

$$\vec{I}_F = \frac{\vec{S}_{NF}^*}{V_F^*} = \frac{S_{NF} \angle -\varphi_1}{V_F \angle -\theta_1} = \frac{S_{NF} \angle -\varphi_1 + \theta_1}{V_F} = I_{NF} \angle -\varphi_1 + \theta_1 \quad (41)$$

Para qualquer valor de tensão aplicado a carga a nova corrente será

$$\vec{I}_F = I_{NF} \angle -\varphi_1 + \theta_1 \quad (42)$$

$$\varphi_{novo} = -\varphi_1 + \theta_1 \quad (43)$$

E a potência absorvida será:

$$S_{NF} = V_F \cdot I_F^* = V_F \angle \theta_1 \cdot (I_{NF} \angle -\varphi_1 + \theta_1)^* = V_F \cdot I_{NF} \angle \varphi_1 \quad (44)$$

Cargas de impedância constante com a tensão: Nesta representação a impedância da carga é constante e resulta das potências ativas e reativas absorvidas pela carga ao ser alimentada com a tensão nominal. Estes modelos normalmente estão associados a capacitores, equipamentos resistivos e cargas residenciais.

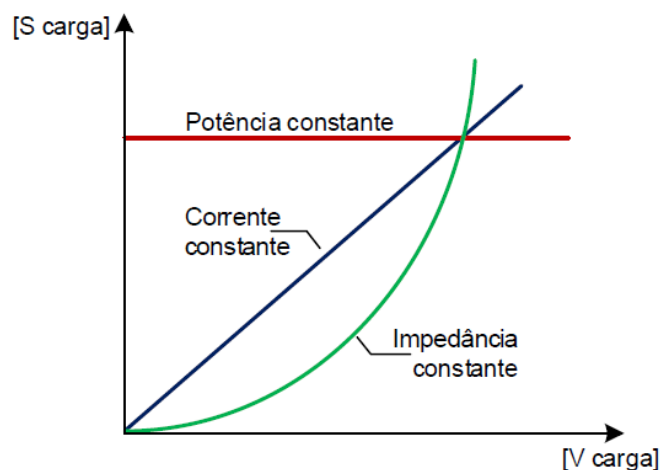
$$\vec{Z}_C = R + jX = \frac{V_{NF}^2}{\vec{S}_{NF}^*} = \frac{V_{NF}^2}{S_{NF}} \angle \varphi \quad (45)$$

Para qualquer tensão aplicada a potência absorvida será:

$$\vec{S}_F = \frac{V_F^2}{\vec{Z}_C^*} = \left(\frac{\vec{S}_{NF}}{V_{NF}^2} \right) \cdot V_F^2 = \vec{S}_{NF} \cdot \left(\frac{V_F}{V_{NF}} \right)^2 \quad (46)$$

Para comparação dos modelos podemos observar o gráfico 1 que relaciona potência absorvida em relação a carga.

Gráfico 1 - Variação de potência absorvida em função da tensão



Fonte: Do autor

A escolha do modelo a ser utilizado deve ser criteriosamente analisada com base no tipo de carga atendida na região de estudo. Geralmente em estudos de fluxo de potência é utilizado o modelo ZIP para toda a empresa ou uma determinada região de estudo. O modelo ZIP consiste em uma composição de combinações dos modelos acima descritos.

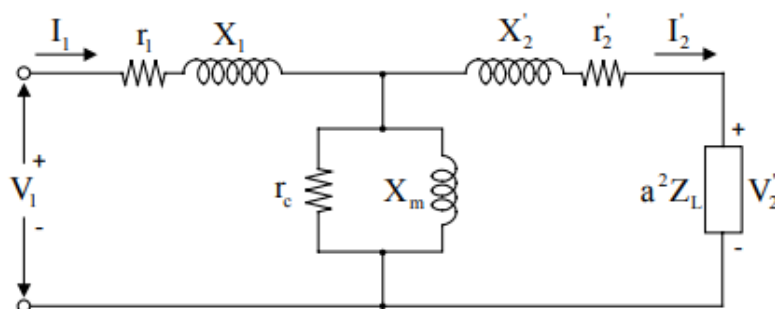
2.2.4. Transformadores

Do mesmo modo que para linhas de transmissão, os transformadores são modelados através do circuito equivalente e equações matemáticas para o cálculo de fluxo de potência.

Em sistemas de transmissão, os transformadores utilizados apresentam algumas semelhanças e outras diferenças quando comparados a outros tipos de transformadores. Em geral utilizamos modelos de transformadores de menor porte e em casos de grande porte podemos desprezar os efeitos de magnetização.

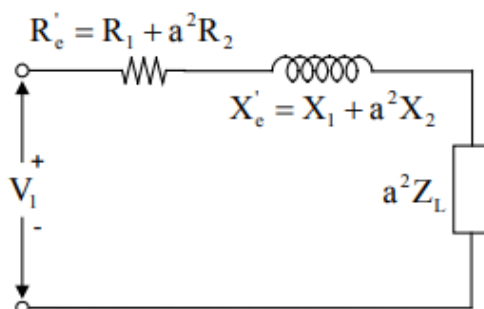
A figura 6 ilustra o modelo do circuito equivalente exato de um transformador real com sua impedância refletida ao primário. Através deste modelo obtemos os parâmetros necessários para os cálculos das componentes equivalentes em circuito aberto. O modelo aproximado, representado na figura 7, simplifica nossos cálculos para obtenção das componentes equivalentes para testes de curto-circuito.

Figura 6 - Modelo exato transformador monofásico refletido ao primário



Fonte: Do autor

Figura 7 - Modelo aproximado de transformador refletido ao primário



Fonte: Do autor

Temos que:

$$a = \frac{n_1}{n_2}, n \text{ é número de espiras} \quad (47)$$

Perdas entreferro são dadas por:

$$r_c = \frac{V_1^2}{P_0} \quad (48)$$

As correntes parasitas e de histerese são dadas por:

$$I_c = \frac{V_1}{r_c} \quad (49)$$

A corrente de magnetização é dada por:

$$I_m = \sqrt{I_1^2 - I_{r_c}^2} \quad (50)$$

A reatância a vazio é dada por:

$$X_m = \frac{V_1}{I_{X_m}} \quad (51)$$

A impedância equivalente é dada por:

$$Z_{eq} = \frac{V_1}{I_{eq}} \quad (52)$$

A resistência equivalente é dada por:

$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (53)$$

A reatância equivalente é dada por:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (54)$$

Em transformadores de três enrolamentos podemos ter potências nominais diferentes. Nestes transformadores expressamos as impedâncias em valores percentuais ou por unidade, tendo em base os valores nominais de seus próprios enrolamentos.

Para relacionar as impedâncias entre os enrolamentos podemos tomar como referência a tensão de um enrolamento e aferir a impedância dos enrolamentos, assim temos que:

$$Z_{ps} = (Z_p + Z_s) \quad (55)$$

$$Z_{pt} = (Z_p + Z_t) \quad (56)$$

$$Z_{st} = (Z_s + Z_t) \quad (57)$$

Onde Z_p é a impedância do primário, Z_s é a impedância do secundário e Z_t é a impedância do terciário.

Já se Z_{ps} , Z_{pt} e Z_{st} forem medidas e referidas ao circuito primário, podemos obter:

$$Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \quad (58)$$

$$Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \quad (59)$$

$$Z_t = \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \quad (60)$$

2.2.5. Geradores

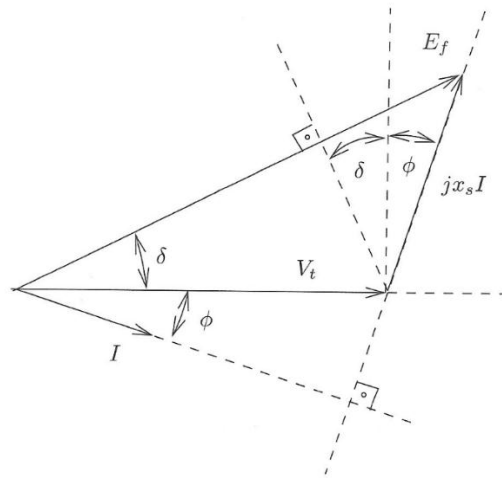
Analisando o sistema elétrico mundial, vemos que praticamente toda a potência ativa consumida é gerada por meio de geradores síncronos.

A potência no eixo do gerador é medida pelo produto da velocidade angular do rotor pelo torque mecânico fornecido por uma turbina a ele ligado. Essas turbinas podem ser do tipo hidráulica ou a vapor. Nas turbinas hidráulicas, a fonte primária de energia é a potencial, provida dos reservatórios de água. Já nas turbinas a vapor, é gerado vapor através da queima de combustíveis.

Máquinas de polos lisos

Através do diagrama fasorial da máquina de polos lisos, representado na figura 8, podemos obter as equações para as potências ativa e reativa do gerador.

Figura 8 - Diagrama fasorial de polos lisos



Fonte: MONTICELLI (2011)

$$|V_t| \sin \delta = x_s |I| \cos(\phi + \delta) \quad (61)$$

$$|E_f| - |V_t| \cos \delta = x_s |I| \sin(\phi + \delta) \quad (62)$$

Ao multiplicar as equações anteriores por $|V_t|$, obtemos:

$$|V_t|^2 \sin \delta = x_s |I| |V_t| \cos(\phi + \delta) \quad (63)$$

$$|E_f| |V_t| - |V_t|^2 \cos \delta = x_s |I| |V_t| \sin(\phi + \delta) \quad (64)$$

Onde podemos obter:

$$x_s^{-1} |V_t|^2 \sin \delta = |I| |V_t| (\cos \delta \cos \phi - \sin \delta \sin \phi) \quad (65)$$

$$x_s^{-1} (|E_f| |V_t| - |V_t|^2 \cos \delta) = |I| |V_t| (\sin \delta \cos \phi - \sin \delta \cos \phi) \quad (66)$$

Através de arranjo matricial podemos obter a potência ativa entregue pela máquina síncrona:

$$P = \frac{|E_f| |V_t|}{x_s} \sin \delta \quad (67)$$

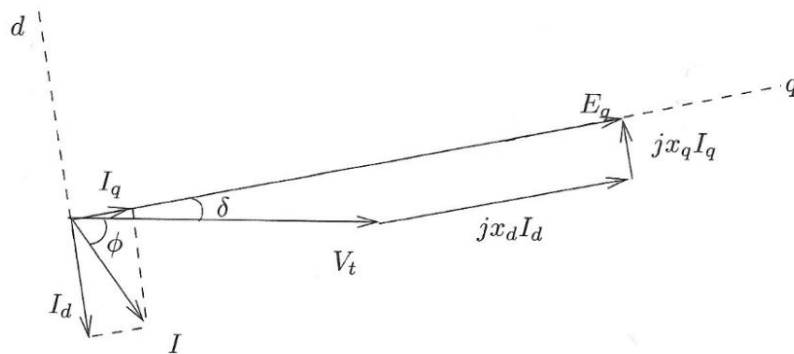
E a Potência reativa:

$$Q = \frac{|E_f||V_t|}{x_s} \cos \delta - \frac{|V_t|^2}{x_s} \quad (68)$$

Máquinas de polos salientes

Podemos também através do diagrama fasorial obter as potências para o modelo de polos salientes, representado na figura 9.

Figura 9 - Diagrama fasorial de polos salientes



Fonte: MONTICELLI (2011)

$$|V_t| \sin \delta = x_q I_q = x_s |I| \cos(\phi + \delta) \quad (69)$$

$$|E_f| - |V_t| \cos \delta = x_d I_d = x_d |I| \sin(\phi + \delta) \quad (70)$$

Do mesmo modo, através de arranjo matricial podemos obter a potência ativa e reativa entregue pela máquina síncrona:

$$P = \frac{|E_f||V_t|}{x_d} \sin \delta + \frac{1}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} |V_t|^2 \sin 2\delta \quad (71)$$

$$Q = \frac{|E_f||V_t|}{x_d} \cos \delta - |V_t|^2 \left(\frac{\sin^2 \delta}{x_d} + \frac{\cos^2 \delta}{x_q} \right) \quad (72)$$

2.2.6. Capacitores

Para o estudo de fluxo de potência a representação dos capacitores se devem a banco de capacitores instalados em subestações para compensação de reativos e também a capacitância das linhas de transmissão devido às suas propriedades.

A reatância capacitiva X_c de cada fase da linha corresponde a parte imaginária da impedância complexa em derivação ou *shunt* Z_{sh} da linha. Isto será dado conforme equação 73:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (73)$$

Onde f é a frequência e C a capacitância da linha

A partir de X_c calcula-se a susceptância da linha conforme equação 74:

$$B_{sh} = \frac{1}{X_c} \quad (74)$$

Para o banco de capacitores será pela fórmula abaixo:

$$B_c = \frac{Mvar}{kV^2 \cdot 1000} \quad (75)$$

Onde $Mvar$ é a potência reativa do banco na escala Mega (10^6) e kV^2 é a tensão elevada ao quadrado.

2.3. Matriz de admitância

Sistemas de transmissão e distribuição de energia estão geograficamente dispersos envolvendo assim um grande número e variedade de componentes elétricos. Ao interligar estes componentes formam-se as redes elétricas, que para podermos analisar necessitamos de uma representação matemática adequada. Esta representação é feita através da forma matricial.

As redes elétricas são representadas de duas maneiras. Utilizando a matriz de impedância (Z), na qual é utilizada para cálculos de curto-circuito e

utilizando a matriz de admitância (Y), onde vamos utilizar para o fluxo de potência, que é o objeto de estudo.

A matriz de admitância relaciona as tensões elétricas nodais com as correntes injetadas ao sistema através dos geradores. Assim sendo temos:

$$I = Y \cdot V \quad (76)$$

Onde: I – Vetor de injeção de correntes na rede;

V – Vetor de tensão nodal nas barras;

Y – Matriz de admitância nodal

Assim a matriz Y será montada analisando duas partes, os elementos da diagonal principal e os elementos fora da diagonal principal.

Elementos diagonal principal:

Admitância própria - Y_{ii} , sendo $i = 1:N$ barras. Soma de todas admitâncias conectadas à barra i .

$$\bar{Y}_{ii} = y_{i0} + \sum_{k=1}^n (y_{ik} + y^{iksh}) \quad (77)$$

Elementos fora diagonal principal:

Admitância mútua - Y_{ik} , sendo $k = 1:N$ barras $\{i \neq k\}$. Negativo da soma de todas admitâncias conectadas entre as barras, i e k , e $Y_{ki} = Y_{ik}$.

$$\bar{Y}_{ik} = -y_{ik} \quad (78)$$

$$[Y_{bus}] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \dots & y_{NN} \end{bmatrix} \quad (79)$$

2.4. Fluxo de potência

O cálculo do fluxo de potência ou fluxo de carga em uma rede de energia elétrica consiste em determinar as tensões complexas nas barras, a distribuição dos fluxos de potência (ativa e reativa) que fluem pelas linhas e transformadores e outras grandezas.

Nesta resolução o sistema é considerado estático e representado por um conjunto de equações algébricas não-lineares. Essa representação é utilizada em situações que as variações da rede com o tempo são suficientemente lentas e assim podem ser desconsiderados os transitórios.

Assim, podemos obter informações nas quais permitem determinar o estado operativo do sistema, se ele está operando adequadamente e ainda podendo indicar correções ou prevenções de situações inadequadas.

Através da premissa de conservação das potências ativas e reativas em cada barra da rede obtemos as equações básicas para o cálculo de fluxo de potência.

$$S_{ik} = P_{ik} + Q_{ik} \quad (80)$$

$$P_{ik} = (a_{ik} \cdot V_i)^2 \cdot g_{ik} - (a_{ik} \cdot V_i) \cdot V_k \cdot g_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik} + \varphi_{ik}) - (a_{ik} \cdot V_i) \cdot V_k \cdot b_{ik} \cdot \sin(\theta_{ik} + \varphi_{ik}) \quad (81)$$

$$Q_{ik} = -(a_{ik} \cdot V_i)^2 \cdot (b_{ik} + b_{ik}^{sh}) + (a_{ik} \cdot V_i) \cdot V_k \cdot b_{ik} \cdot \cos(\theta_{ik} + \varphi_{ik}) - (a_{ik} \cdot V_i) \cdot V_k \cdot g_{ik} \cdot \sin(\theta_{ik} + \varphi_{ik}) \quad (82)$$

Sendo:

Linhas de transmissão – $a_{ik} = 1$ e $\varphi_{ik} = 0$;

Transformadores em fase – $b_{ik}^{sh} = 0$ e $\varphi_{ik} = 0$;

Defasadores puros – $b_{ik}^{sh} = 0$ e $a_{ik} = 1$;

Defasadores – $b_{ik}^{sh} = 0$.

2.4.1. Método Gauss-Seidel

O método de *Gauss-Seidel* consiste numa adaptação do algoritmo do ponto fixo, cujo princípio está em substituições sucessivas.

Para uma barra qualquer do sistema precisamos definir a corrente que entra nesta barra:

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot \dot{V}_j \quad (83)$$

Ou

$$\dot{I}_i = \dot{V}_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1 \neq i}^n Y_{ij} \cdot \dot{V}_j \quad (84)$$

Onde, Y_{ij} é elemento da matriz Y_{bus} .

Na barra i , P e Q são:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i \cdot I_i^* \quad (85)$$

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = \dot{V}_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1 \neq i}^n Y_{ij} \cdot \dot{V}_j, \text{ para } j \neq i \quad (86)$$

Neste caso a formulação matemática do fluxo de potência corresponde a um sistema de equações algébricas não lineares e deve ser resolvido por uma técnica iterativa.

A barra *Swing* é definida com um valor de tensão fixo (módulo e ângulo), assim, serão resolvidas $2(n-1)$ equações de modo iterativo.

Em condições normais de operação do sistema as tensões nas barras aproximam-se de 1,0 p.u. No geral, a magnitude das tensões nas barras de carga é levemente inferior à barra *Swing*, já nas barras de geração é levemente superior. Os ângulos de fase nas barras de cargas são menores que a *Swing*, já na geração, são ligeiramente maiores.

Deste modo, podemos definir inicialmente como $1\angle 0^\circ$ como tensões iniciais.

Para barras P-Q calculamos:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} + \sum y_{ij} \cdot V_j^{(k)}}{\sum y_{ij}}, \text{ com } j \neq i. \quad (87)$$

Para barras P-V calculamos:

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^k \cdot y_{ii} - \sum_{j=1 \neq i}^n y_{ij} \cdot V_j^{(k)} \right] \right\} \quad (88)$$

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} + \sum y_{ij} \cdot V_j^{(k)}}{\sum y_{ij}} \quad (89)$$

Com $j \neq i$.

Como $|V_i|$ é conhecido a parte real é calculada por:

$$\left(e_i^{(k+1)} \right)^2 + \left(f_i^{(k+1)} \right)^2 = |V_i|^2 \quad (90)$$

$$e_i^{(k+1)} = \sqrt{|V_i|^2 - \left(f_i^{(k+1)} \right)^2} \quad (91)$$

$$V_i^{(k+1)} = e_i^{(k+1)} + f_i^{(k+1)} \quad (92)$$

Após obtenção dos resultados comparamos os valores da interação atual com a anterior:

$$\left| e_i^{(k+1)} - e_i^{(k)} \right| \leq \varepsilon \quad (93)$$

$$\left| f_i^{(k+1)} - f_i^{(k)} \right| \leq \varepsilon \quad (94)$$

Caso $\varepsilon = 0,00001$ até $0,00005$ p.u. , o sistema convergiu e não são mais necessárias interações. Caso o valor seja superior devemos atualizar as tensões das barras com os valores obtidos na última interação e recalculas todas as barras.

Após o sistema convergir, podemos calcular P e Q da barra *Swing*:

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^k \cdot y_{ii} - \sum_{j=1 \neq i}^n y_{ij} \cdot V_j^{(k)} \right] \right\} \quad (95)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^k \cdot y_{ii} - \sum_{j=1 \neq i}^n y_{ij} \cdot V_j^{(k)} \right] \right\} \quad (96)$$

Com $j \neq i$.

Posteriormente a determinação das tensões de todas as barras, devemos calcular os fluxos de potência nas linhas que podem ser obtidas através das correntes que entram e saem das barras e as perdas pela soma algébrica das potências complexas entre as barras.

2.4.2. Método Newton-Raphson

O método *Newton-Raphson* é um método iterativo que aproxima um conjunto de equações não-lineares simultâneas por um conjunto de equações lineares usando expansão por séries de Taylor e os termos são restritos a aproximação de primeira ordem.

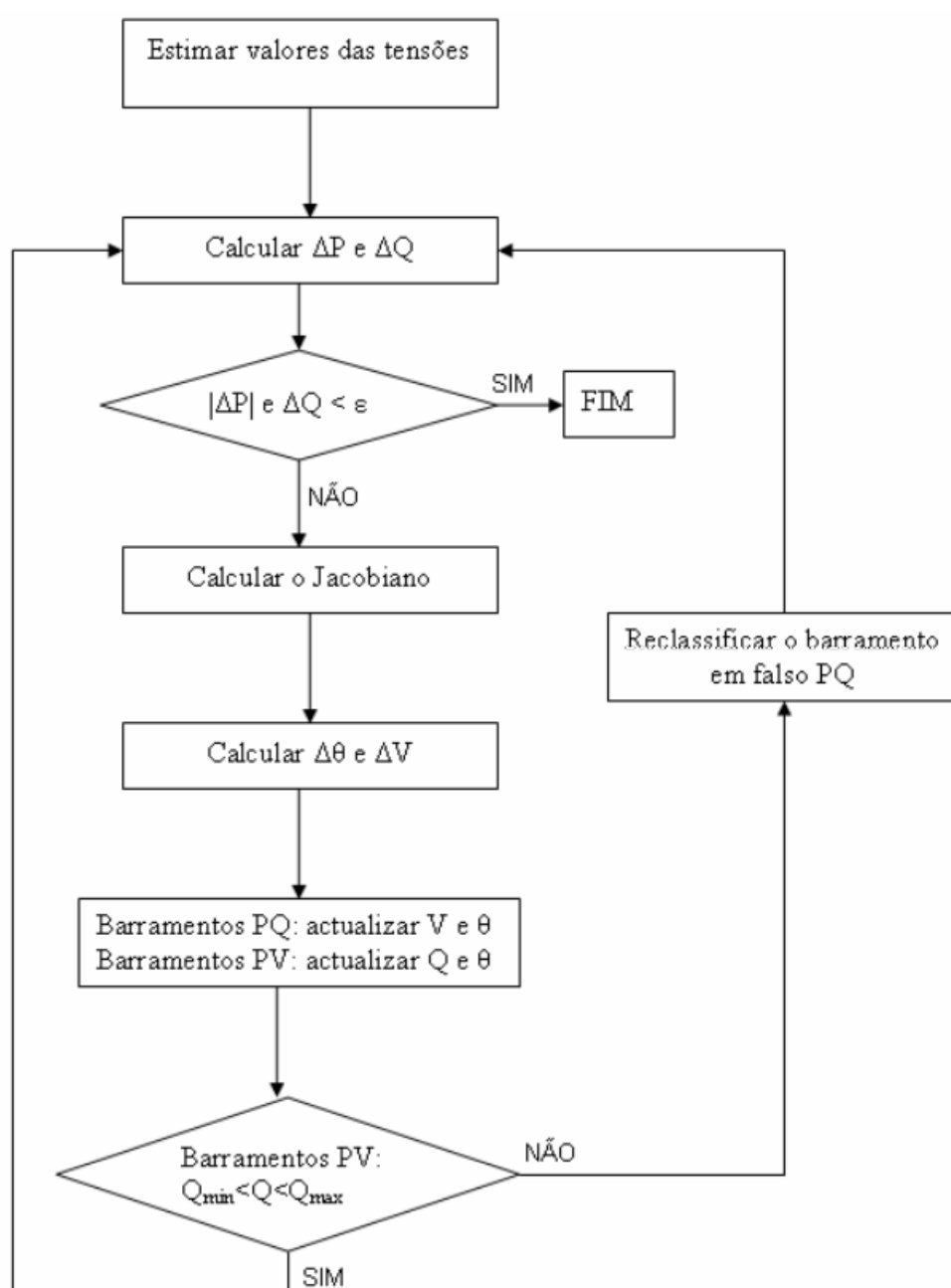
Este método é matematicamente superior ao método anteriormente visto e possui uma integridade maior ao divergir em caso de sistemas mal condicionados.

Devido a essa superioridade o método *Newton-Raphson* é mais eficiente para grandes sistemas de potência. A principal vantagem é que o número de

interações necessárias para obter a uma solução é independente do tamanho do problema, isso o torna computacionalmente mais eficiente.

Diferente do método de *Gauss-Seidel*, que em base calculamos as tensões das barras, no método *Newton-Raphson* vamos calcular as variações de Potência Ativa e Reativa das barras com base em uma potência estipulada e para validar vamos verificar se esse Delta está nos limites aceitáveis. Em base o método é executado conforme a figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de Newton-Raphson



Fonte: Do autor, com base em Zanetta Jr. (2006)

2.5. Modelagem para o MATPOWER

O MATPOWER é um pacote de arquivos ".m" de licença gratuita em linguagem MATLAB de código aberto para resolver problemas de simulação e otimização de sistemas de energia em regime permanente, como fluxo de potência, fluxo de energia de continuação, fluxo de potência ótimo, entre outros. Foi desenvolvido com objetivo de ser uma ferramenta de simulação para pesquisadores e educadores, de fácil edição e utilização.

Na modelagem da rede, a magnitude dos elementos é expressa em P.U. e o ângulo complexo em radianos. As barras são numeradas consecutivamente iniciando do número 1 e os geradores são reordenados pelo número do barramento.

Todos os modelos e equações são apresentados no MATPOWER em forma de matriz e vetor. Isso se dá devido ao fato de utilizar o MATLAB como base de programação, e este possuir grandes capacidades no manuseio de matrizes e vetores.

2.5.1. Formato de dados

Os arquivos de dados utilizados pelo MATPOWER são arquivos MATLAB do tipo *M-file* (.m) ou *MAT-file* (.mat) que definem e retornam uma única estrutura padrão do MATLAB.

O arquivo do tipo *M-file* nada mais é do que um arquivo de texto simples que pode ser editado em qualquer editor de texto padrão. Sua estrutura é composta dos campos baseMVA, bus, branch, gen e opcionalmente gecost, onde baseMVA é um escalar e os outros elementos são matrizes.

Nestas matrizes cada lida linha corresponde a um único elemento, podendo ser um barramento, uma linha ou gerador. As colunas são semelhantes às do formato IEEE CDF (*Common Data Format*).

Abaixo na figura 11 temos um exemplo de uma rede modelada no MATPOWER onde podemos observar as barras, linhas, geradores. No ANEXO A estão apresentados todos valores correspondentes as colunas das matrizes bus, gen e branch.

Figura 11 - Rede exemplo MATPOWER

```

17 %%----- Power Flow Data -----%%
18 %% system MVA base
19 mpc.baseMVA = 100;
20
21 %% bus data
22 % bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV
23 mpc.bus = [
24     1 2 0 0 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
25     2 1 300 98.61 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
26     3 2 300 98.61 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
27     4 3 400 131.47 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
28     5 2 0 0 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
29 ];
30
31 %% generator data
32 % bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax
33 mpc.gen = [
34     1 40 0 30 -30 1 100 1 40 0 0 0 0 0
35     1 170 0 127.5 -127.5 1 100 1 170 0 0 0 0 0
36     3 323.49 0 390 -390 1 100 1 520 0 0 0 0 0
37     4 0 0 150 -150 1 100 1 200 0 0 0 0 0
38     5 466.51 0 450 -450 1 100 1 600 0 0 0 0 0
39 ];
40
41 %% branch data
42 % fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio
43 mpc.branch = [
44     1 2 0.00281 0.0281 0.00712 400 400 400 0 0 1
45     1 4 0.00304 0.0304 0.00658 0 0 0 0 0 1
46     1 5 0.00064 0.0064 0.03126 0 0 0 0 0 1
47     2 3 0.00108 0.0108 0.01852 0 0 0 0 0 1
48     3 4 0.00297 0.0297 0.00674 0 0 0 0 0 1
49     4 5 0.00297 0.0297 0.00674 240 240 240 0 0 1
50 ];
51

```

Fonte: Do autor

2.5.2. Branch – Branches (Ramificações)

Todas as linhas de transmissão, transformadores, defasadores são modelados com um *common branch model*. Ele consiste em um modelo Pi de linhas de transmissão, com impedância série $Z_s = R_s + jX_s$ e susceptância total b_c . Os parâmetros R_s , X_s e b_c são representados diretamente nas colunas BR_R(3), BR_X(4), BR_B(5), na linha correspondente da matriz. Quando o branch representar um transformador temos os valores do TAP e da fase que estão nas colunas TAP(9) e SHIFT(10).

2.5.3. Gen – Generators (Geradores)

Um gerador é modelado como uma injeção de energia complexa em um barramento específico. Para o gerador i , a injeção é:

$$S_G^i = P_G^i + jQ_G^i$$

Os equivalentes de MW e MVar de P_G e Q_G são especificados nas colunas PG(2) e QG(3), respectivamente, da linha i da matriz gen.

2.5.4. Loads (Cargas)

Cargas de potência constante são modeladas diretamente com a quantidade de potência ativa e reativa consumida na barra. Os equivalentes são representados nas colunas PD(3) e QD(4) respectivamente.

Cargas de impedância constante são modeladas como elementos shunts, que serão descritos no item 2.5.5.

2.5.5. Shunt

Os capacitores e indutores são modelados diretamente conforme a admitância $Y_{sh} = G_{sh} + jB_{sh}$ do elemento conectado a barra.

$G_{sh} + jB_{sh}$ são especificados nas colunas GS(5) e BS(6), respectivamente, onde é informado o equivalente em MW (Consumido) e MVar (Injetado) em uma magnitude de tensão nominal de 1.0 P.U. e ângulo zero.

2.6. Modelagem para o OpenDSS

Softwares que resolvem fluxo de potência tais como o MATPOWER e o ANAREDE, é primeiramente criada as barras e depois os elementos são conectados a elas. No OpenDSS o processo é diferente, primeiramente devemos criar os elementos do sistema (transformadores, geradores, cargas, ...) e no próprio elemento dizemos em quais barras ele está conectado.

A estrutura principal do OpenDSS é desenvolvida em *Object Pascal* usando o ambiente *Delphi*, outras estruturas para solução de matrizes esparsas são desenvolvidas em C e C++. Como o seu código fonte é aberto, é possível compilar para diversas plataformas. Ele possui integração com Windows, Linux, Mac OSX, Raspberry Pi, entre outros. Além disso é possível aplicações em Java

utilizar o OpenDSS através de JNI. Isso o torna uma aplicação muito flexível e econômica.

Basicamente o OpenDSS trabalha com três modelos básicos:

Primeiro modelo é o BUS (barra). O BUS pode conter N nós, onde o nó zero é o nó de referência para o software. O nó zero não necessariamente está sendo referenciado ao terra, essa definição pode ser feita pelo usuário ao efetuar a modelagem.

O segundo modelo é o PD (Power Delivery). Os elementos referenciados a este modelo são elementos que recebem energia de um lado e transferem para o outro lado, por exemplo linhas, transformadores, capacitores. Os elementos do tipo PD podem conter N terminais com N conectores em ambos os lados. Via de regra, cada terminal pode se conectar a apenas uma barra. Geralmente o PD é representado por uma matriz de admitância nodal.

O último modelo é o PC (Power Conversion). São elementos que recebem ou geram energia, como por exemplo as cargas, geradores, equivalentes de Thevenin, entre outros. O PC contém um terminal que pode conter N conectores.

Para a criação de qualquer elemento no OpenDSS devemos utilizar o comando *"New"*.

Caso precisamos obter as informações de um elemento podemos utilizar o comando *"dump tipoElemento.NomeElemento debug"*. Este comando criará um arquivo com todas as informações vinculadas ao elemento.

Dentre os caracteres especiais utilizados no OpenDSS, destacamos os seguintes:

"~" – Continuação da linha imediatamente acima.

"//" – Início de comentários que serão ignorados pelo software.

"!" – Início de comentário em linhas de comando.

"|" – Delimitador de linhas de matriz.

"," – Delimitador de classe, objeto, nó ou barra.

2.6.1. Circuit

O elemento *Circuit* representa o equivalente da transmissão que será conectado a distribuição. Devemos informar qual a tensão de linha ou *p.u.* e para as impedâncias informamos os pares de potências (trifásica e monofásica),

pares das correntes ou das os pares das impedâncias. Este elemento sempre deve existir no OpenDSS, ele representa a barra *Swing*. Como exemplo temos:

```
New circuit.Exemplo bus1=barra100 basekv=13.8 phases=3
mvasc3=2000 mvasc1=2100
```

Onde:

New – Comando para criação de novo elemento.

Exemplo – Nome dado para o elemento “*circuit*”.

bus1 – Definição em qual barra ele está conectado, neste caso “*barra100*”.

basekv – Tensão base do elemento, neste caso “*13.8*” sempre em kV.

phases – Número de fases do elemento, neste caso “*3*” fases.

mvasc3 – Potência de curto-circuito trifásico, neste caso “*2000*”.

mvasc1 – Potência de curto-circuito monofásico, neste caso “*2100*”.

2.6.2. Line

Esse elemento representa as linhas elétricas. O OpenDSS utiliza o modelo π para representar as linhas. Neste elemento devemos fornecer os valores de R_0 , X_0 , R_1 e X_1 , todos devem ser em Ohms/Km ou Ohms/mi, conforme a unidade de medida da linha, seu comprimento e a escala. Também é fornecido as capacitâncias shunt caso não sejam desprezíveis. Como exemplo temos:

```
New line.Linha_Exemplo phases=3 bus1=barra100 bus2=barra200
length=0.5 units=km
~ r1=0.06 x1=0.10 r0=0.18 x0=0.40 c1=3 c0=1
```

Onde:

New – Comando para criação de novo elemento.

Linha_Exemplo – Nome dado ao elemento “*line*” criado.

phases – Número de fases do elemento, neste caso “*3*” fases.

bus1 – Definição da barra DE, neste caso “*barra100*”.

bus2 – Definição da barra PARA, neste caso “*barra200*”.

length – Comprimento da linha, neste caso “*0.5*” unidades de medida.

units – Unidade de medida, neste caso “*km*”.

r0 – Resistência de Sequência Zero, em Ohms por unidade de medida.

x0 – Reatância de Sequência Zero, em Ohms por unidade de medida.

c0 – Capacitância de Sequência Zero, em Ohms por unidade de medida.
r1 – Resistência de Sequência Positiva, em Ohms por unidade de medida.
x1 – Reatância de Sequência Positiva, em Ohms por unidade de medida.
c1 – Capacitância de Sequência Positiva, em Ohms por unidade de medida.

2.6.3. Transformer

É utilizado para representar todos os tipos de transformadores. Ao modelar este componente devemos informar qual o tipo de ligação do transformador (delta ou estrela), as tensões no primário e secundário, além de *Rm*, *Rs*, *Ls* e *Lm*. Como exemplo temos:

```
New transformer.Trafo_Exemplo xhl=6 windings=2 %loadloss=0.5
%noloadloss=0.1 %imag=0.5
```

```
~ wdg=1 bus=barra200 kv=13.8 kva=25 conn=wye
```

```
~ wdg=2 bus=barra300 kv=0.22 kva=25 conn=wye
```

Onde:

New – Comando para criação de novo elemento.

Trafo_Exemplo – Nome dado ao elemento “transformer” criado.

xhl – Reatância Hi-Low percentual do transformador, neste caso “6”%.

windings – Número de enrolamentos.

%loadloss – Percentual de perda em carga em relação a potência nominal.

%noloadloss – Percentual de perda a vazio em relação a potência nominal.

%imag – Percentual da corrente de magnetização em relação a corrente nominal.

wdg=1 – Início da descrição do primeiro enrolamento.

bus=barra200 – Definição de qual barramento o enrolamento 1 está conectado.

kv=13.8 – Definição da tensão do enrolamento primário.

kva=25 – Potência do transformador, neste caso, “25”MVA.

conn – Tipo de ligação do primário do transformador, neste caso “wye” (estrela).

2.6.4. Load

Esse elemento representa as cargas do sistema. Ao criar devemos dizer qual é o modelo de carga (potência constante, impedância constante ou corrente constante), tipo de conexão (delta ou estrela), número de fases, a tensão nominal. Ainda devemos informar pelo menos dois entre potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência. Como exemplo temos:

```
New load.Carga_Exemplo phases=3 model=1 bus=barra300 kv=0.22
kw=10 kvar=4 conn=wye
```

Onde:

New – Comando para criação de novo elemento.

Carga_Exemplo – Nome dado ao elemento “load” criado.

phases – Número de fases do elemento, neste caso “3” fases.

model – Modelo de carga, neste caso “1” potência constante.

bus – Definição em qual barra ele está conectado, neste caso “barra300”.

kv – Tensão de linha da carga.

kw – Potência ativa da carga.

kvar – Potência reativa da carga.

conn – Tipo de ligação da carga, neste caso “wye” (estrela).

2.6.5. Capacitor

Esse elemento consiste em modelar bancos de capacitores. No OpenDSS ele será vinculado a alguma barra, normalmente é associado em paralelo. Devemos informar o número de fases, o barramento que está conectado e também a tensão de linha. Como exemplo temos:

```
New Capacitor.cap_exemplo phases=3 bus1=barra400 kvar=100 kv=0.22
```

Onde:

New – Comando para criação de novo elemento.

cap_exemplo – Nome dado ao elemento “Capacitor” criado.

phases – Número de fases do elemento, neste caso “3” fases.

Bus1 – Definição em qual barra ele está conectado, neste caso “barra400”. Como não está ligado a outra barra a conexão é em paralelo.

kvar – Potência reativa injetada.

kv – Tensão de linha.

3. METODOLOGIA

Este trabalho propõe a construção de uma ferramenta que irá converter automaticamente redes elétricas de distribuição modeladas a partir do MATPOWER para um modelo genérico correspondente ao software OpenDSS. Para atingir o objetivo proposto foram necessárias várias etapas de estudos, programação e testes.

3.1. Etapa 1 – Fundamentação teórica

Inicialmente foi realizada a revisão bibliográfica necessária para o estudo do SEP, que inclui desde os valores por unidade, modelos dos elementos do SEP e métodos de fluxo de potência. Em seguida foi fundamental o estudo aprofundado da estrutura de modelagem e lógica do MATPOWER e do OpenDSS.

Esses estudos possibilitaram a compreensão dos modelos apresentados nas seções 2.5 e 2.6. São análises fundamentais para gerar as lógicas da ferramenta proposta, que vão desde a validação do arquivo de entrada, até a entrega da rede convertida para o usuário.

A validação do problema proposto foi desenvolvida através da busca sistematizada por artigos científicos utilizando o software “*Harzing’s Publish or Perish*”. Com ele foi possível definir algumas palavras-chave que são do interesse, podendo ser palavras no texto, autores, lugares de publicações, eteceteras. Com essas definições o software trabalha juntamente com mecanismos de busca para varrer e organizar os títulos mais semelhantes, ordenando-os por maiores citações em outros trabalhos e número de acessos.

Tendo em vista a necessidade estudada, foram analisados trabalhos acadêmicos no contexto nacional que visam solucionar essa demanda através de pesquisa via Google Acadêmico com as palavras-chave “OpenDSS” e “fluxo de potência”. Após a análise de 172 publicações, foram selecionadas 9 cujos títulos foram considerados relevantes. Ao estudar essas nove publicações foi possível concluir que não há trabalhos que satisfaçam essa demanda no Brasil.

3.2. Etapa 2 – Conversão de modelos

Nesta etapa foram estudados como fazer a conversão de um modelo do MATPOWER para um modelo ou equivalente do OpenDSS. Com este estudo foram relacionados seis modelos. Circuit, que representa o equivalente de transmissão, Tranformer sendo os transformadores, Line sendo as linhas, Load sendo as cargas, Capacitor sendo os shunts e Generator os geradores.

Circuit – Conforme estudado na seção 2.6, para qualquer rede modelada no OpenDSS é necessário existir um elemento Circuit (Item 2.6.1), que representa o equivalente de transmissão.

Para modelar o elemento Circuit deve ser convertido os dados da barra de referência da rede do MATPOWER, que neste caso é indicada como uma barra do tipo “3”. Este valor está presente na coluna 2 da matriz BUS.

Será informado no modelo o número da barra, a tensão de base, a tensão de operação em p.u., e a potência base do sistema.

Os parâmetros necessários para compor este elemento estão dispostos na matriz “mpc.bus” do MATPOWER, Tabela 1 do Anexo A, com exceção da potência base do sistema que é disposta diretamente através do “mpc.baseMVA”.

Como padrão é definido que a rede a ser convertida trabalha com barramento infinito. Neste caso o modelo ainda é composto com pares complexos das impedâncias de sequência zero e positiva tendendo a zero.

Tranformer – Para gerar um modelo equivalente de transformador no OpenDSS é analisado a matriz BUS do MATPOWER, onde verificamos se há alterações entre os valores da coluna 10 que corresponde a tensão de base da barra, e a matriz BRANCH, onde estão dispostas as ramificações.

Na matriz BRANCH obtemos as barras que estão conectadas as bobinas do transformador. Esta indicação está disposta na coluna 1, representando o “DE” e na coluna 2, representando “PARA”. Também obtemos a impedância em relação do primário para o secundário, disposta na coluna 4. O TAP do transformador na coluna 9, a potência na coluna 6.

Line – Para criar os modelos de linhas utilizamos basicamente o mesmo processo que é feito para os modelos de transformadores.

As linhas estão dispostas juntamente na matriz BRANCH, assim para diferir entre um transformador e uma linha devemos analisar alguns parâmetros na estrutura do MATPOWER.

A primeira análise é feita na matriz BUS, verificando a tensão base entre as barras.

Na matriz BRANCH podemos analisar o TAP (coluna 9) e a susceptância (coluna 5).

Quando se trata de linhas o valor do TAP sempre é “1” e a susceptância tende a ser maior que zero. Já em transformadores a susceptância é sempre zero e o TAP tende a ser diferente de “1”.

Devemos ainda considerar se o circuito está ou não ativo, neste caso deve ser considerado o valor presente na coluna 11.

Load – Para criar os modelos de cargas devemos analisar a matriz BUS do MATPOWER.

Cargas de potência constantes são obtidas diretamente da coluna 3 e coluna 4, representando a potência ativa e reativa sucessivamente. Podendo algum dos valores ser nulo.

Cargas de impedância constantes são obtidas diretamente da coluna 5 e coluna 6, representando a potência ativa e reativa sucessivamente. Neste caso, ambos os valores devem ser diferentes de zero. Caso o valor da coluna 5 seja nulo, este elemento na realidade é um *Capacitor*, representando por outro modelo.

Capacitor – Os shunts de linha são obtidos diretamente da coluna 5 e coluna 6. A potência reativa injetada é fornecida na coluna 6. Devemos utilizar a coluna 5 e verificar que ela seja nula, assim temos a certeza que está sendo modelado um shunt de linha. Este processo pode ser feito juntamente com o Load pois utilizam os mesmos parâmetros.

Generator – A criação do modelo de geradores utiliza a matriz GEN e a matriz BUS. Essa necessidade se dá devido ao modelo de gerador a ser utilizado.

Ao analisar a matriz GEN necessitamos a barra que ele está conectado, representado na coluna 1, a potência ativa representada na coluna 2, máxima

potência reativa representada na coluna 4 e a mínima potência reativa representada na coluna 5.

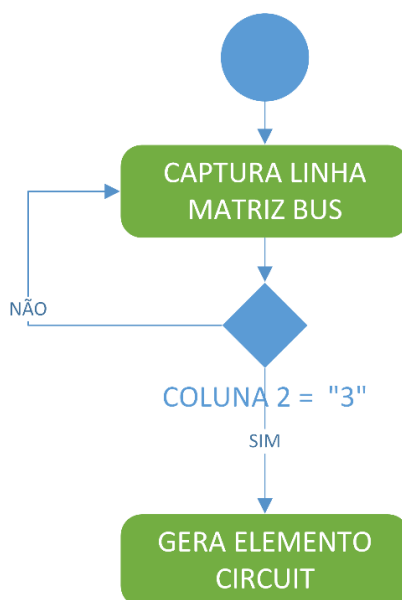
Devemos ainda usar a matriz BUS para verificar o tipo de barra que esse gerador está conectado. Caso seja uma barra do tipo PV, indicamos um gerador de modelo 3 no OpenDSS, que possui potência ativa e tensão constantes. Caso seja uma barra do tipo PQ, indicamos um gerador de modelo 1 no OpenDSS, que possui potência ativa e potência reativa constantes.

3.3. Etapa 3 – Algoritmos para conversão do modelo

Circuit – Para encontrar a barra correspondente ao Circuit deve ser percorrido as linhas da matriz BUS. Este processo é feito através de um *looping*.

O processo consiste numa captura linha por linha da matriz BUS e comparando a coluna 2 com o numeral inteiro “3”. Enquanto o valor for diferente ele pula para a próxima linha da matriz e compara com o novo valor. Ao encontrar o valor correto é iniciado o processo para gerar o modelo. Os dados necessários para compor o modelo estão na própria linha capturada.

Figura 12 - Processo de geração do Circuit



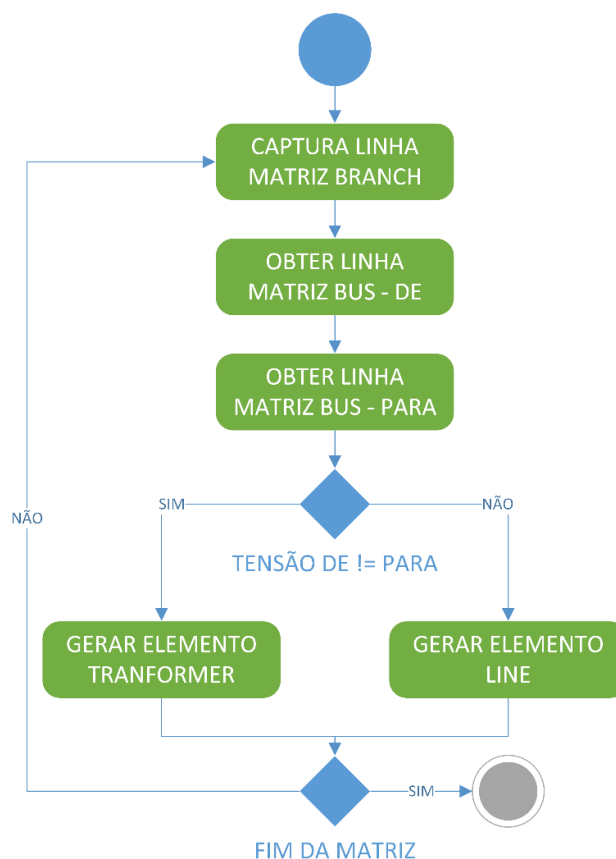
Fonte: Do autor

Transformer e Line – O processo para criar transformadores e linhas é feito no mesmo *looping*. A matriz BRANCH é percorrida linha a linha até o último elemento.

O processo começa capturando a linha da matriz BRANCH. Com os valores obtidos da coluna 1 e coluna 2 desta linha, são utilizados nos processos seguintes para obter as linhas correspondentes da matriz BUS comparados a coluna 1, isto é, são obtidos todos valores das barras correspondentes a esse ramo.

Seguindo o processo é feita a comparação das tensões de base entre as barras, o TAP e a susceptância para definir se corresponde a um modelo de transformador ou uma linha, direcionando para o processo correspondente e já com todos os valores necessários para o modelo obtidos.

Figura 13 - Processo de geração do Transformer e Line



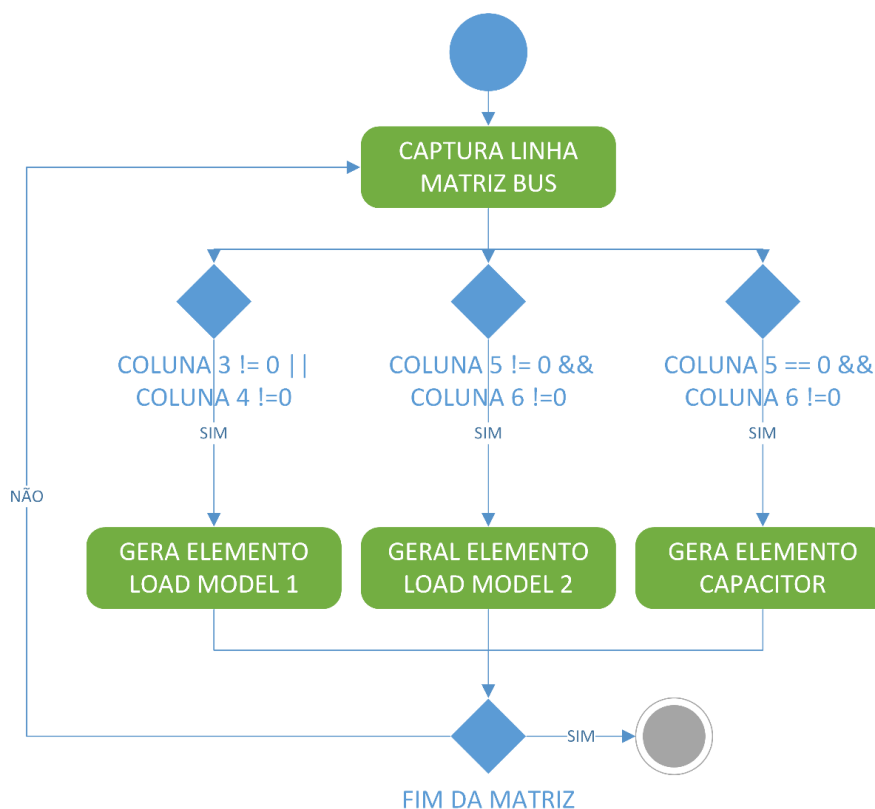
Fonte: Do autor

Load e Capacitor – O processo para criar as cargas e shunts da rede é feito através de um único *looping* percorrendo toda a matriz BUS.

O processo se dá capturando linha a linha da matriz BUS e são feitas três verificações condicionais nas colunas desta linha para definir se o elemento existe e caso sim criá-lo. A primeira verificação se dá nas colunas 3 e 4. Caso

seja satisfeita a condição é gerado um elemento Load do tipo potência constante. A segunda verificação se dá nas colunas 5 e 6. Caso seja satisfeita a condição é gerado um elemento Load do tipo impedância constante. A terceira verificação se dá nas colunas 5 e 6 novamente. Caso seja satisfeita a condição é gerado um elemento Capacitor. Todos os valores necessários para compor os elementos estão presentes na linha corrente do processo.

Figura 14 - Processo de geração do Load e Capacitor



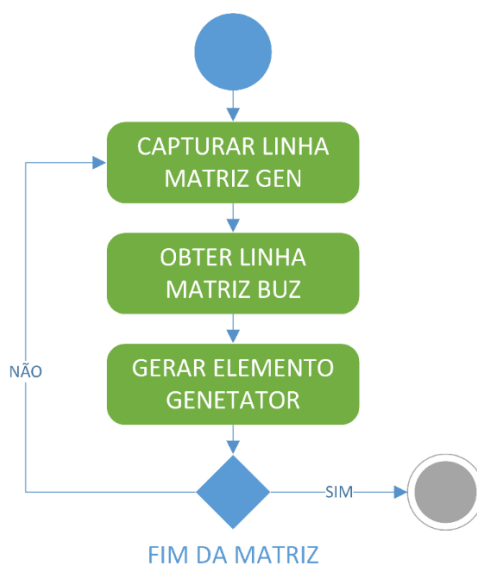
Fonte: Do autor

Generator – Os geradores são criados em um processo simples. A matriz GEN é percorrida totalmente através de um *looping*.

O processo se dá capturando linha a linha da matriz GEN. No processo seguinte é utilizado o valor da coluna 1 da matriz GEN, que corresponde ao número do barramento, para obter a linha correspondente na matriz BUS comparados a coluna 1, que nesta temos todos os dados da barra. Este mesmo processo foi visto para transformadores e linhas.

Ao concluir, é iniciado o processo de criar o elemento *Generator*. Neste processo é verificado o tipo da barra para alterar os parâmetros necessários.

Figura 15 - Processo de geração do Generator



Fonte: Do autor

3.4. Etapa 4 – Criação do sistema DumpDSS

Da mesma forma que a maioria dos softwares que resolvem fluxo de potência, o OpenDSS utiliza um arquivo texto que contém rede elétrica modelada a ser resolvida. Este arquivo é composto pelos elementos vistos na seção 2.6.

A ferramenta desenvolvida consiste em um algoritmo computacional para o qual foi definido como ambiente um sistema Web, composto de um servidor Linux Ubuntu³ executando PHP⁴ 7.1 e Apache⁵ 2.2. O algoritmo é descrito na linguagem de programação PHP junto com o framework Laravel 5.6. Este framework permite trabalhar de forma estruturada e rápida, facilitando a programação. O sistema é composto por diversas etapas para automação do processo de conversão conforme pode ser analisada na figura 16.

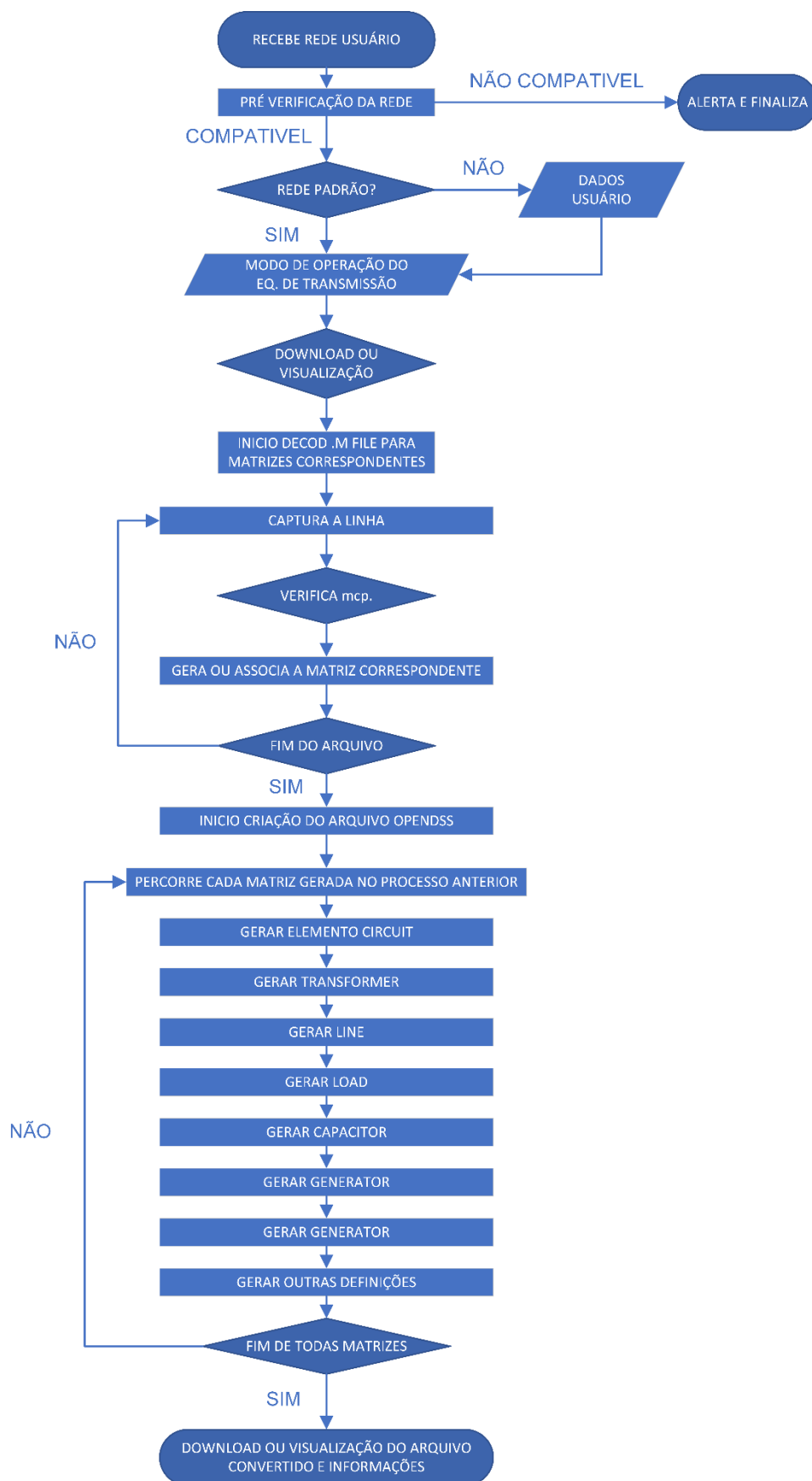
Na tela inicial da ferramenta o operador entra com a rede para ser convertida, ao fornecer o arquivo, a ferramenta executa uma pré-verificação de compatibilidade do arquivo e informa qual é a barra swing do sistema. Caso haja incompatibilidades ele alerta o usuário e interrompe o processo, caso seja compatível solicita confirmação se a rede está modelada conforme os padrões do MATPOWER (ANEXO A).

³ Sistema operacional software livre.

⁴ Linguagem de programação interpretada.

⁵ Servidor web livre.

Figura 16 - Fluxograma de execução da ferramenta



Fonte: Do autor

Posteriormente é dado como opção para o usuário definir o modo de operação da barra *Swing*, opção de fazer *download* ou visualizar o arquivo convertido na tela. Ao ser selecionado uma das opções a ferramenta começa o processo de decodificação da rede fornecida pelo usuário.

Primeiramente é feita uma varredura linha a linha do arquivo fornecido buscando os parâmetros conhecidos do modelo correspondente do MATPOWER. Estes modelos baseiam-se na estrutura básica vista no item 2.5.1. Através do modelo encontrado é associado o valor desta linha a matriz correspondente de dados simplificados que serão utilizadas no próximo processo para criação dos elementos do OpenDSS.

Ao término da varredura do arquivo de entrada, inicia-se o processo de criação de dois arquivos. O primeiro o arquivo é de extensão “dss” e contém a rede convertida pronta para ser executada no software OpenDSS. O segundo arquivo que é um arquivo texto com informações de comentários do arquivo da rede original e outras anotações geradas pela ferramenta.

Sequencialmente, a ferramenta executa múltiplos *loopings* com o objetivo de percorrer todas as matrizes geradas no processo anterior. Através dos estudos dos modelos do MATPOWER e OpenDSS foram projetados os blocos para capturar os valores necessários das matrizes e gerar os elementos equivalentes correspondentes no formato padrão do OpenDSS.

Ao finalizar todas as matrizes, caso o usuário tenha optado em fazer o *download* da rede, a ferramenta cria um arquivo compactado “contendo os dois arquivos gerados, a rede convertida no formato “.dss” e o arquivo de informações no formato “.txt”, e efetua o *download* automático. Caso tenha optado por apenas visualizar, é apenas apresentado na tela do navegador a rede convertida, sem a opção do arquivo de comentário. Ao iniciar os trabalhos de programação foi necessário criar um nome para o projeto. O comando “dump” é muito utilizado no PHP e em bancos de dados para mostrar ou despejar valores. Associando a ideia de extrair dados arquivos de redes elétricas para gerar novos modelos para o OpenDSS, esta ferramenta foi batizada com o nome de DumpDSS.

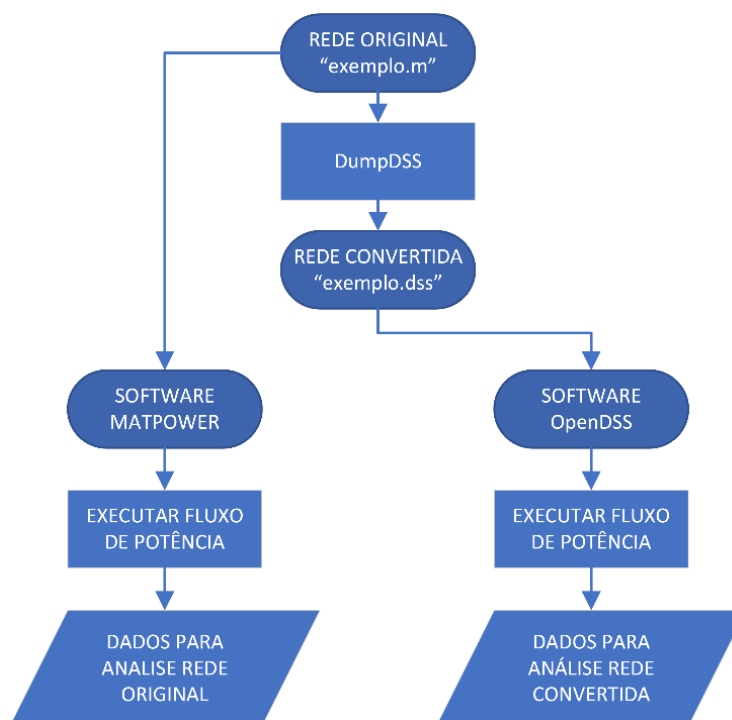
3.5. Etapa 5 – Testes de conversão

Para validação da ferramenta foram feitas análises comparativas entre os arquivos de saída da rede original e da rede convertida. Estas análises se basearam na comparação das tensões e ângulos das barras, fluxo de potência nos circuitos e as perdas de potência da rede. Estes arquivos são obtidos conforme pode ser observado na figura 17.

O arquivo “exemplo.m” contém toda a estrutura da rede elétrica original. Este arquivo é utilizado como dados de entrada no DumpDSS, que irá gerar a rede convertida. É utilizado ainda no MATPOWER para obter os dados para serem analisados. Este processo é feito através da execução do fluxo de potência com o comando “runpf(‘nomedocaso’), onde *nomedocaso* é o valor associado a variável *mpc* da rede.

O arquivo “exemplo.dss” contém a rede elétrica convertida, isto é, um modelo equivalente a rede original na estrutura do OpenDSS. Este arquivo é utilizado como dados de entrada no OpenDSS para obter os dados para serem analisados. Este processo é feito através da execução do fluxo de potência com o comando “Solve”.

Figura 17 - Fluxograma de conversão e teste



Fonte: Do autor

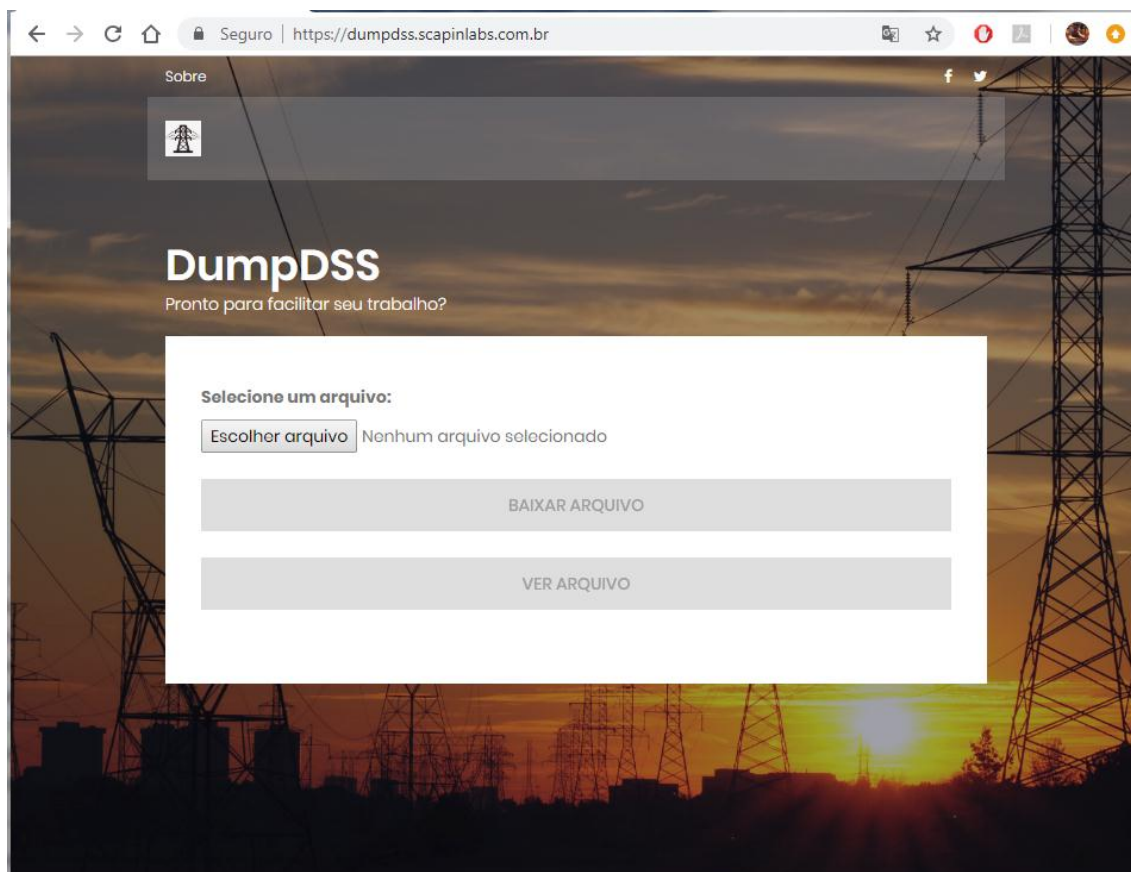
4. RESULTADOS E VALIDAÇÕES

Neste capítulo será apresentado a forma de utilizar o DumpDSS, os resultados da conversão da rede de distribuição, resultados do fluxo de potência da rede original e da rede convertida, análise das tensões das barras, análise do fluxo de potência das linhas e análise das perdas técnicas de potência.

4.1. Utilizando o DumpDSS

Ao acessar a ferramenta é permitido ao usuário ingressar com a rede no formato do MATPOWER. Este processo é feito clicando no botão “Escolher arquivo” conforme visto na figura 18. Após a seleção da rede pelo usuário a ferramenta inicia o processo de pré-verificação do arquivo selecionado. Este processo verifica a estrutura de dados da rede conforme o padrão do MATPOWER, analisando heurísticamente os blocos “mpc.”, versão e uma varredura em busca da barra *Swing*. Caso o arquivo disponibilizado não seja compatível é disparado um alerta na tela informando-o.

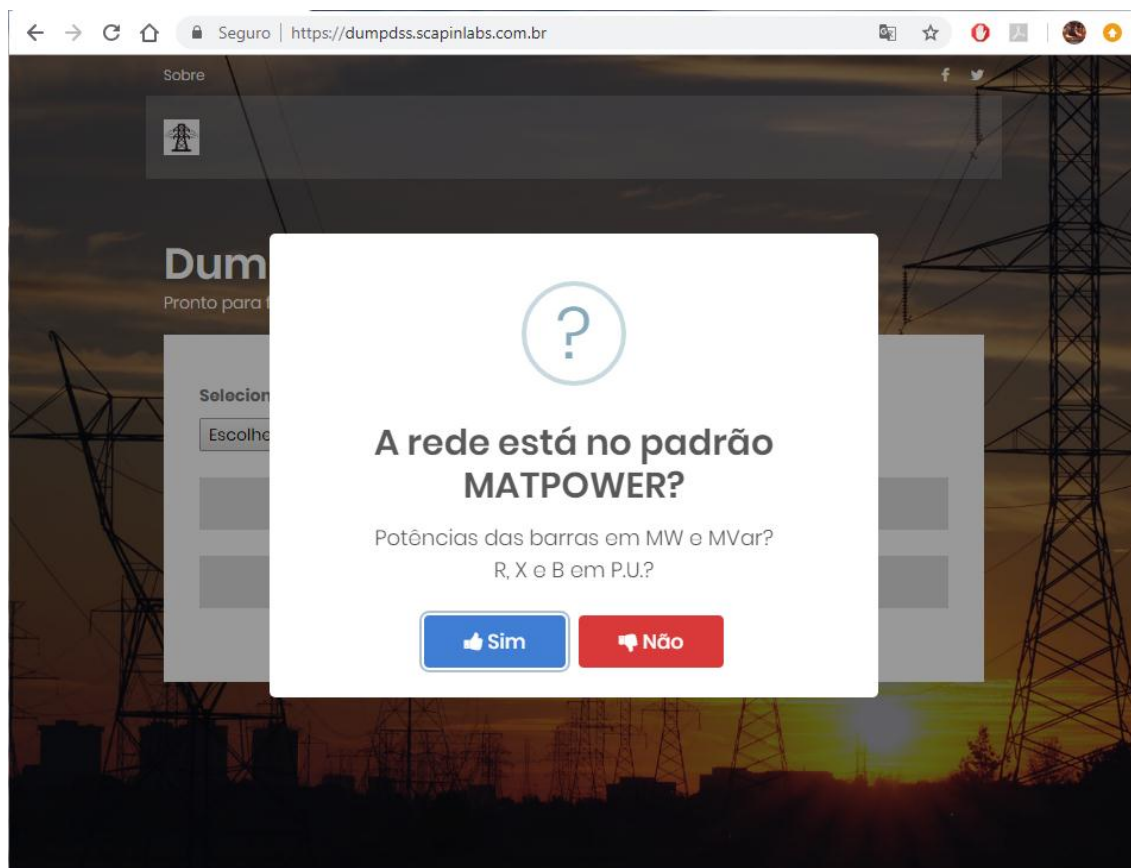
Figura 18 - Tela inicial da ferramenta



Fonte: Do autor

Se o arquivo atender os requisitos da pré-verificação, é disparado um alerta para o usuário solicitado se a rede está nos padrões dos formatos de dados do MATPOWER (ANEXO A) conforme a figura 19.

Figura 19 - Tela alerta de solicitação da rede no padrão



Fonte: Do autor

Caso o usuário entrar com uma rede nos padrões, deverá ser selecionado a opção “Sim” e não há necessidade de ajustes manuais dos valores.

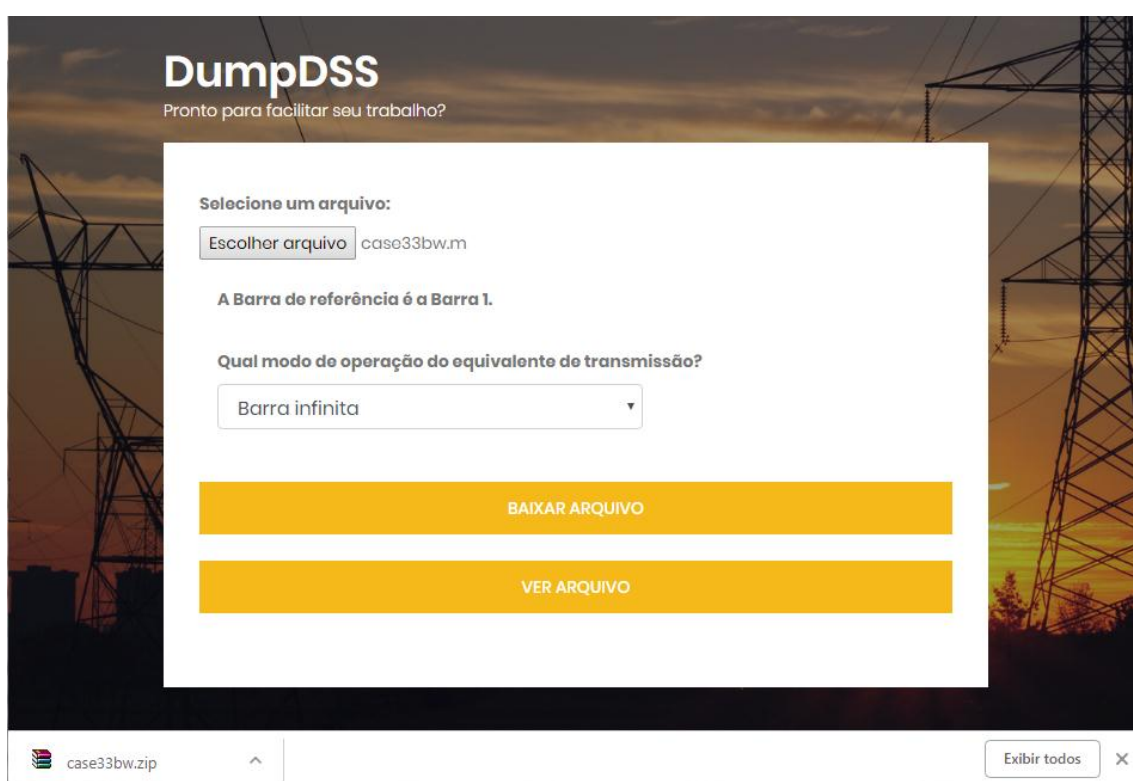
Após selecionar a opção, é informado ao usuário qual a barra de referência da rede original e solicitado qual o modo de operação que a barra deve trabalhar, sendo fornecido 4 opções:

- 1 – Barramento infinito, neste caso não há entrada de dados;
- 2 – Informando os pares das impedâncias complexas;
- 3 – Informando os pares das potências de curto-circuito;
- 4 – Informando os pares das correntes de curto-circuito.

A figura 20 mostra a seleção de *download* da rede de 33 barras em modo barramento infinito. Esta rede está nos padrões do MATPOWER.

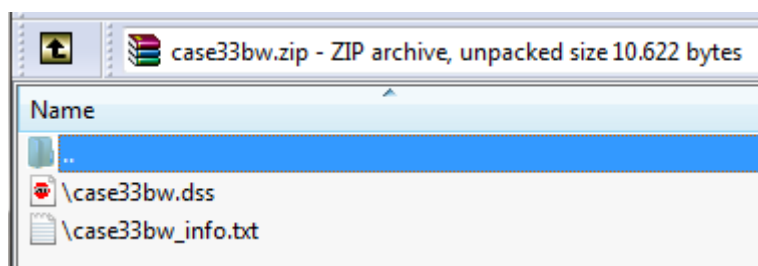
Na figura 21 temos a visualização do arquivo de saída da ferramenta. Este é um arquivo compactado com extensão “.zip” tendo outros dois arquivos na sua composição, a rede convertida “case33bw.dss” e o arquivo de informações “case33bw_info.txt” gerados pela ferramenta com informações pertinentes da conversão.

Figura 20 - Conversão rede 33 barras em barramento infinito



Fonte: Do autor

Figura 21 - Arquivo “.zip” rede 33 barras convertido



Fonte: Do autor

Caso o usuário entre com uma rede que não está nos padrões de formato de dados do MATPOWER, deverá selecionar “Não” na opção da figura 19 e ajustar manualmente a escala que está sendo modelada.

A figura 22 mostra uma rede não padrão, sendo necessário informar a escala da potência ativa, potência reativa, condutância *shunt*, reatância *shunt* e também se a matriz BRANCH está modelada em P.U. ou Ohms. Ainda na figura 22, pode ser observado que a barra de referência vai operar com os limites das potências de curto-circuito. Com estas informações o algoritmo faz as conversões necessárias para evitar erros nos modelos.

Figura 22 - Exemplo de tela rede não padrão MATPOWER

The screenshot shows the DumpDSS web application interface. The browser address bar displays 'Seguro | https://dumpdss.scapinlabs.com.br'. The page header includes a 'Sobre' link and social media icons. The main heading is 'DumpDSS' with the tagline 'Pronto para facilitar seu trabalho?'. The interface contains several configuration sections:

- Selecione um arquivo:** A button labeled 'Escolher arquivo' followed by the filename 'case5.m'.
- Padrões do sistema:** Four dropdown menus for 'Pd:', 'Qd:', 'Gs:', and 'Bs:'. 'Pd:' and 'Gs:' are set to 'MW', while 'Qd:' and 'Bs:' are set to 'MVar'.
- Linhas R, X e B:** A dropdown menu set to 'P.U.'.
- A Barra de referência é a Barra 4.** A statement indicating the reference bus.
- Qual modo de operação do equivalente de transmissão?** A dropdown menu set to 'Potências de curto-circuito da Barra'.
- MVAsc3:** A text input field with the value 'Entre com a potência de curto-circuito trifásico'.
- MVAsc1:** A text input field with the value 'Entre com a potência de curto-circuito monofásico'.

Fonte: Do autor

4.2. Conversão rede 33 Barras IEEE

Para validação da ferramenta foi elegida a rede de 33 barras apresentada no artigo de M. E. Baran e F. F. Wu (1989). Trata-se de uma rede radial de distribuição de energia composta por 1 gerador, 33 barras, 37 linhas e 32 cargas.

Esta rede encontra-se modelada no formato de dados do MATPOWER (ANEXO B) e é disponibilizada juntamente com o pacote de arquivos do MATPOWER ao fazer o download. O processo de conversão e coleta de dados foi executado conforme seção 3.5.

No Apêndice A estão os arquivos gerados pela ferramenta após a conversão. O primeiro arquivo com extensão “.dss” consiste na rede convertida e com este foi executado o fluxo de potência no OpenDSS.

4.3. Fluxo de potência

Inicialmente foi executado o fluxo de potência da rede original no MATPOWER. O método de cálculo utilizado é o *Newton-Raphson*. A figura 23 mostra parte do arquivo de saída do MATPOWER (Apêndice B), ao analisarmos concluímos que a rede convergiu em três interações e levou o tempo de 0,05 segundos para concluir o cálculo do fluxo de potência. Ainda são dispostas informações importantes sobre o sistema, como as quantidades de elementos, as potências combinadas destes elementos, entre outras como:

Máxima tensão: 1,0 pu, localizada na barra 1;

Mínima tensão: 0,913 pu, localizada na barra 18;

Total de perdas ativas: 0,2 MW;

Total de perdas reativas: 0,14 MVar.

O processo seguinte se deu realizando a execução do fluxo de potência na rede convertida no OpenDSS. O método de cálculo utilizado é o *Newton-Raphson*. A figura 24 apresenta o sumário após a resolução do fluxo de potência. Diferente do MATPOWER, as informações das tensões das barras, fluxo de potência nas linhas e outras informações são dispostas em arquivos separadamente conforme solicitado pelo usuário. Analisando, é possível concluir que a rede convergiu e foram necessárias três interações para resolver o fluxo de potência, ainda ressaltamos os valores:

Máxima tensão: 1,0 pu;

Mínima tensão: 0,91738 pu;

Total de perdas ativas: 0,186083 MW;

Total de perdas reativas: 0,123776 MVar.

Figura 23 - Parcial do arquivo de saída MATPOWER

```

MATPOWER Version 6.0, 16-Dec-2016 -- AC Power Flow (Newton)
Newton's method power flow converged in 3 iterations.
Converged in 0.05 seconds
=====
|      System Summary      |
=====
How many?      How much?      P (MW)      Q (MVar)
-----
Buses          33      Total Gen Capacity    10.0      -10.0 to 10.0
Generators     1      On-line Capacity      10.0      -10.0 to 10.0
Committed Gens 1      Generation (actual)    3.9        2.4
Loads         32      Load                  3.7        2.3
  Fixed       32      Fixed                  3.7        2.3
  Dispatchable 0      Dispatchable          -0.0 of -0.0 -0.0
Shunts         0      Shunt (inj)            -0.0        0.0
Branches       37      Losses (I^2 * Z)       0.20        0.14
Transformers   0      Branch Charging (inj)   -          0.0
Inter-ties     0      Total Inter-tie Flow    0.0        0.0
Areas          1
-----
Minimum      Maximum
-----
Voltage Magnitude 0.913 p.u. @ bus 18      1.000 p.u. @ bus 1
Voltage Angle     -0.50 deg @ bus 18      0.50 deg @ bus 30

```

Fonte: Do autor

Figura 24 - Sumário do fluxo de potência OpenDSS rede 33 barras

```

Status = SOLVED
Solution Mode = Snap
Number = 100
Load Mult = 1.000
Devices = 71
Buses = 33
Nodes = 99
Control Mode = STATIC
Total Iterations = 3
Control Iterations = 1
Max Sol Iter = 3

- Circuit Summary -

Year = 0
Hour = 0
Max pu. voltage = 1
Min pu. voltage = 0.91738
Total Active Power: 2.81544 MW
Total Reactive Power: 2.34574 Mvar
Total Active Losses: 0.186083 MW, (6.609 %)
Total Reactive Losses: 0.123776 Mvar
Frequency = 60 Hz
Mode = Snap
Control Mode = STATIC
Load Model = PowerFlow

```

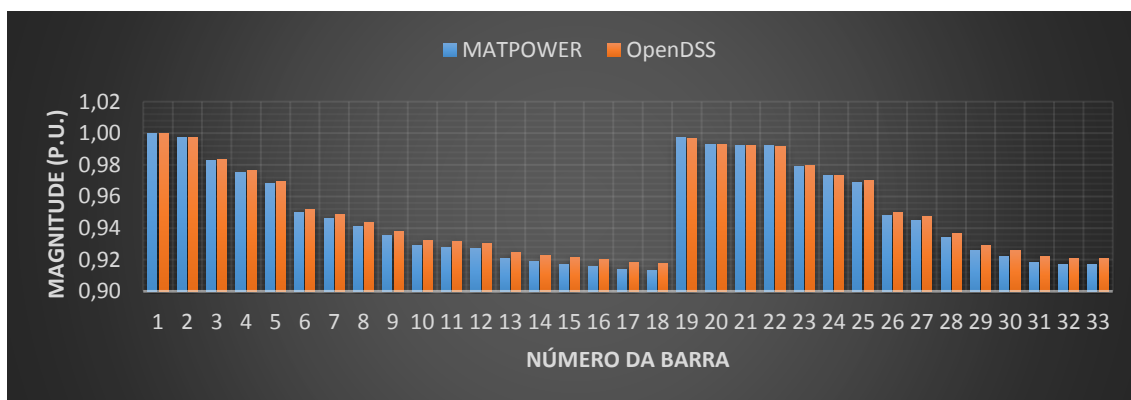
Fonte: Do autor

4.4. Análise de tensões das barras

Esta análise consiste em comparar as magnitudes e as fases de cada barra entre a rede original e a rede convertida. Após a execução do fluxo de potência das redes em suas respectivas plataformas, foram tratados os dados de saída (Apêndice B) e dispostos em gráficos de barras correspondentes.

No gráfico 2 estão dispostos paralelamente a magnitude da tensão de todas as barras que compõe a rede. O gráfico 3 apresenta divergência percentual da magnitude da tensão em relação a rede original, isto é, qual é a proporção que a magnitude da tensão de cada barra da rede convertida está maior ou menor que a rede original. Consideramos para questão de validação que a tensão na rede convertida deve se manter o mais próximo da rede original. Neste caso a maior divergência foi de 0,477% correspondente a barra número 18. A menor divergência, desconsiderando a barra de referência, foi de 0,003% correspondente a barra número 20. A média ficou em 0,236%.

Gráfico 2 - Magnitude das tensões das barras



Fonte: Do autor

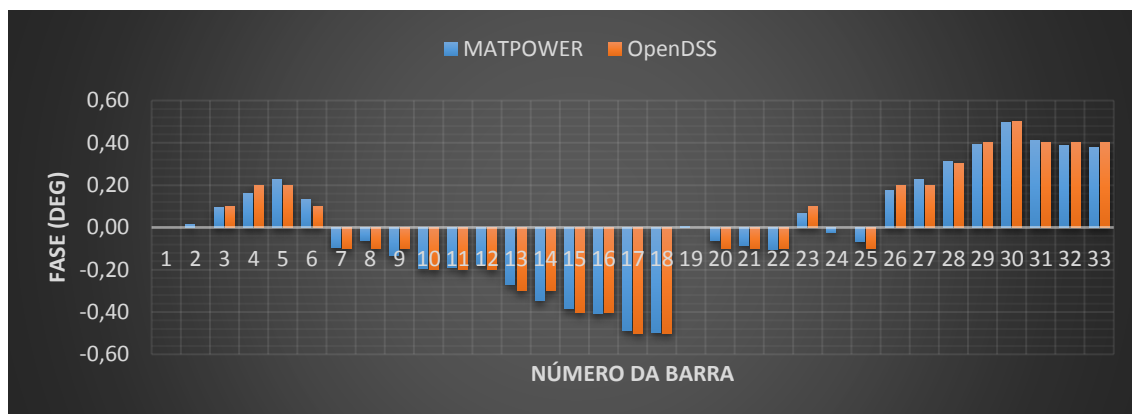
Gráfico 3 - Divergência percentual da magnitude da rede convertida



Fonte: Do autor

No gráfico 4 estão dispostas a fase da tensão das barras da rede. Podemos observar um comportamento equivalente ao observado na magnitude, onde não há grandes elevações de valores.

Gráfico 4 - Fase das tensões das barras



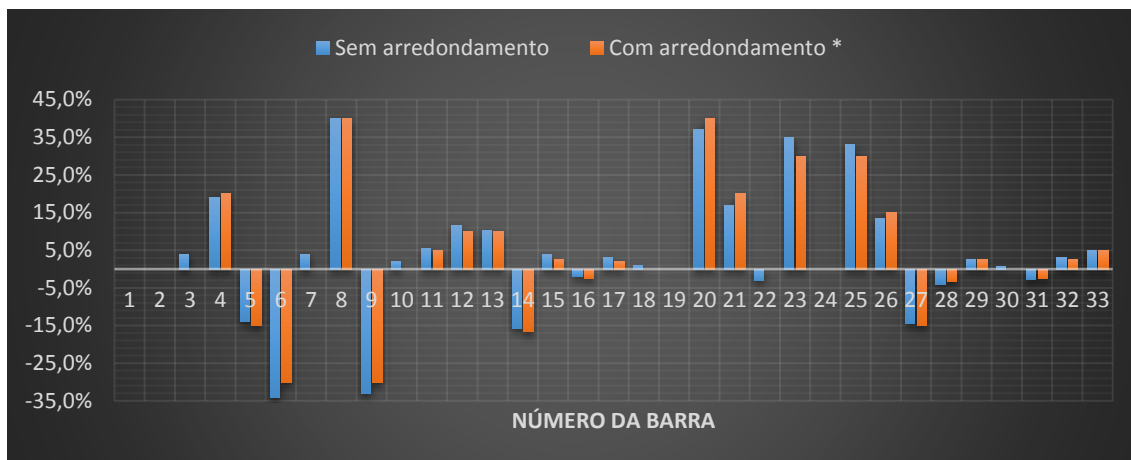
Fonte: Do autor

O gráfico 5 apresenta a divergência percentual da fase em da rede convertida em relação a rede original. O OpenDSS ao disponibilizar os dados do fluxo de potência para o usuário efetua um arredondamento nos valores da fase, disponibilizando apenas uma casa decimal. Como no MATPOWER temos quatro casas decimais para este valor, ocorre divergência elevada entre as redes através de erros de divisão. Ainda é possível observar que quando menor os valores, tanto para magnitude, quanto para fase, maior será essa divergência.

Analisando essa situação de casas decimais foi efetuada uma nova análise teórica através do arredondamento científico para duas casas decimais no MATPOWER. Como pode ser observado, houve uma redução pouco significativa na divergência por se tratar de valores pequenos.

Seguindo nesta análise, foi efetuado novamente o arredondamento mantendo-se apenas uma casa decimal para se igualar a condição do OpenDSS. Neste caso todos os valores de fase entre o OpenDSS e o MATPOWER ficaram iguais, considerando que não há divergência entre todos valores. Assim considera-se que a tensão e fase das barras do sistema estão dentro de valores aceitáveis e suficientemente precisos.

Gráfico 5 - Divergência percentual da fase da rede convertida em relação a rede original



Fonte: Do autor

4.5. Análise do fluxo de potência nas linhas

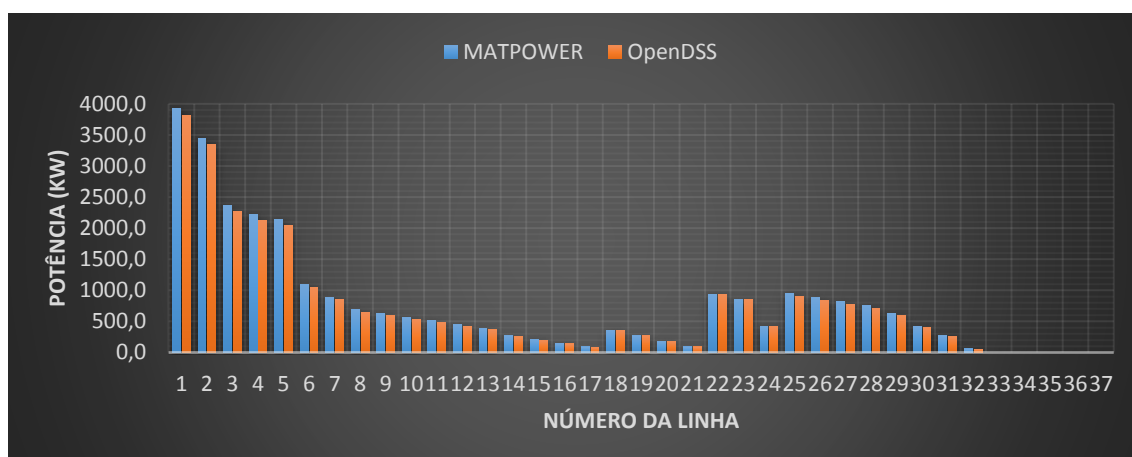
Esta análise consiste em comparar o fluxo de potência ativa e reativa de dos terminais das linhas entre a rede original e a rede convertida. Após a execução do fluxo de potência das redes em suas respectivas plataformas, foram tratados os dados de saída (Apêndice B) e dispostos em gráficos de barras correspondentes.

O gráfico 6 e o gráfico 7 apresentam o fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente, no terminal 1 dos circuitos, isto é, a potência ativa e reativa que está entrando na linha. Nota-se que nos circuitos 33, 34, 35, 36 e 37 os valores estão nulos, isto se dá, pois, estes circuitos fazem parte da rede, mas estão fora de operação.

Para questões de validação é esperado que o fluxo de potência da rede convertida (OpenDSS) seja o mais próximo possível da rede original (MATPOWER). O gráfico 8 apresenta a divergência percentual do fluxo de potência ativa e reativa do terminal 1 em relação a rede original, isto é, qual a proporção que a potência ativa e reativa de cada circuito da rede convertida está maior ou menor que a rede original.

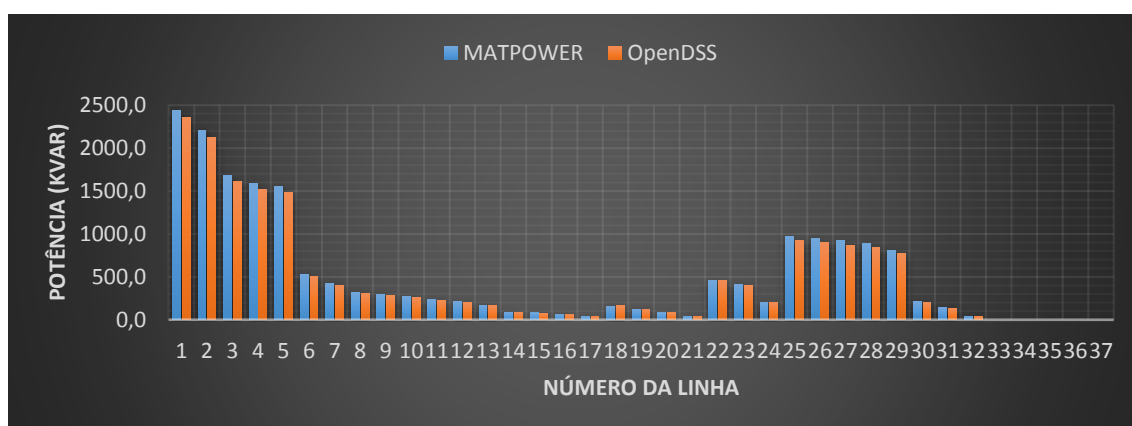
Em potência ativa a maior divergência foi de -7,11% no circuito 11 e o menor 0,00% no circuito 21. A média ficou em -4,24%. Em potência reativa a maior divergência foi de -7,00% no circuito 17 e o menor 0,25% nos circuitos 20 e 21. A média ficou em -4,17%.

Gráfico 6 - Fluxo de potência ativa terminal 1



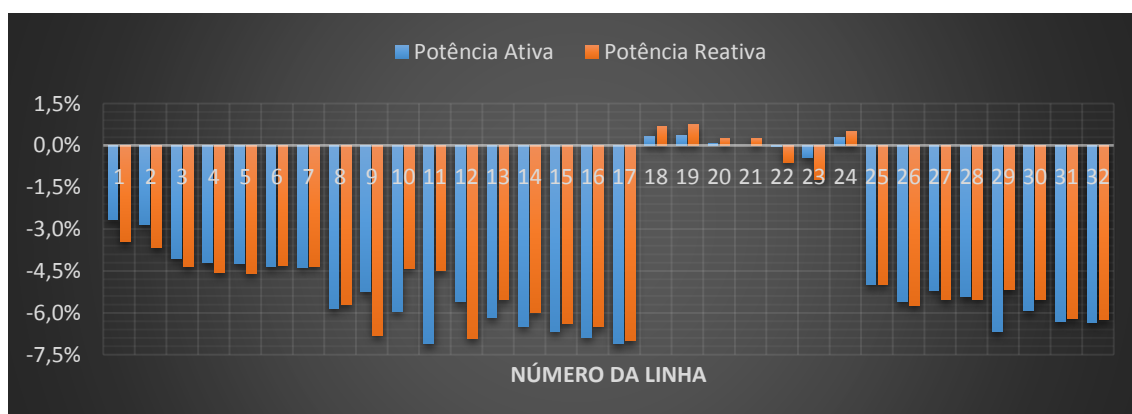
Fonte: Do autor

Gráfico 7 - Fluxo de potência reativa terminal 1



Fonte: Do autor

Gráfico 8 - Divergência percentual do fluxo de potência do terminal 1 da rede convertida em relação a rede original

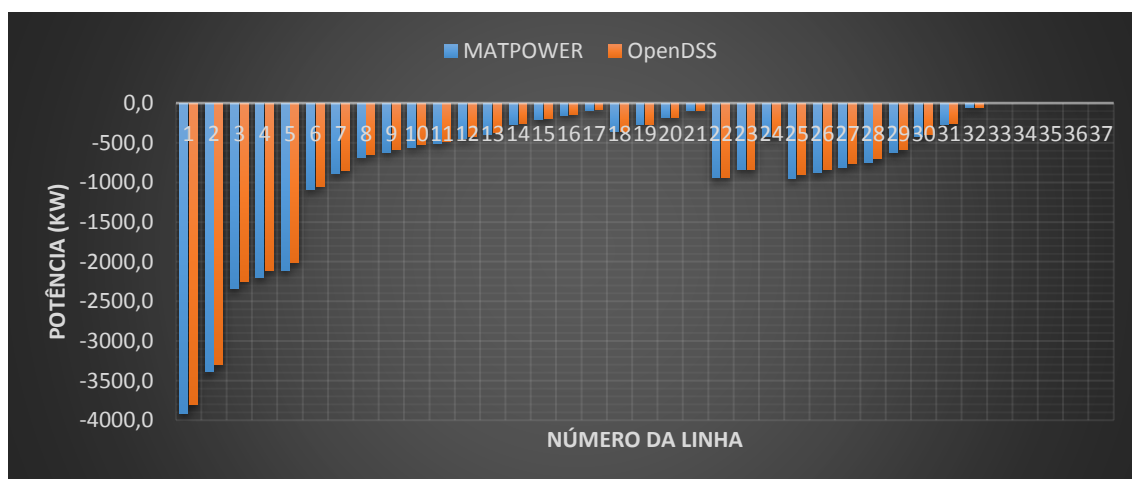


Fonte: Do autor

O gráfico 9 e o gráfico 10 apresentam o fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente, no terminal 2 dos circuitos, isto é, a potência ativa e reativa que está saindo na linha. O gráfico 11 apresenta a mesma análise de divergência efetuada no terminal 1.

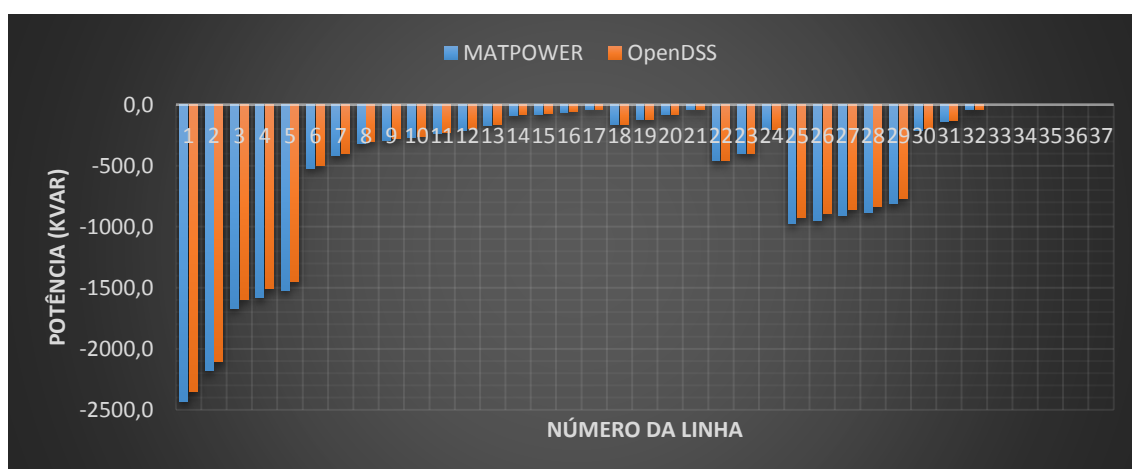
Em potência ativa a maior divergência foi de -7,11% no circuito 17 e o menor 0,0% nos circuitos 20 e 21. A média ficou em -4,23%. Em potência reativa a maior divergência foi de -7,81% no circuito 12 e o menor 0,00% nos circuitos 21 e 24. A média ficou em -4,22%.

Gráfico 9 - Fluxo de potência ativa terminal 2



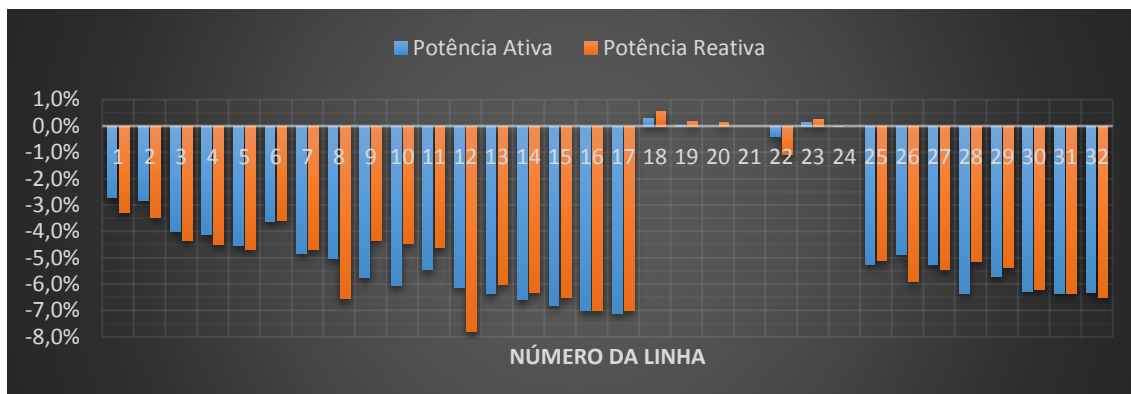
Fonte: Do autor

Gráfico 10 - Fluxo de potência reativa terminal 2



Fonte: Do autor

Gráfico 11 - Divergência percentual do fluxo de potência do terminal 2 da rede convertida em relação a rede original



Fonte: Do autor

Os valores das divergências observadas nos gráficos 8 e 11 apresentam uma semelhança com os observados no gráfico 5, que se refere a fase das tensões das barras. Neste caso as potências ativas e reativas do MATPOWER são apresentadas em MW com apenas duas casas decimais de resolução, enquanto no OpenDSS são informados em kW com uma cada decimal de resolução. Ao efetuar o arredondamento científico dos valores do OpenDSS foi observado uma aproximação aos valores do MATPOWER, consequentemente a diminuição da divergência de todo sistema.

As divergências apresentadas nos gráficos 8 e 11 estão relacionados a erros de resolução entre a disposição dos resultados das ferramentas. Entretanto essas divergências podem ser consideradas aceitáveis devido ao seu valor reduzido em relação aos valores absolutos observados nos gráficos 6, 7, 9 e 10 e também considerando uma média aceitável. Assim considera-se que o fluxo de potência do sistema está dentro de valores aceitáveis.

4.6. Análise das perdas de potência

Esta análise consiste em comparar a potência ativa e reativa relativa as perdas técnicas entre a rede original e a rede convertida. Após a execução do fluxo de potência das redes em suas respectivas plataformas, foram tratados os dados de saída. A tabela 2 apresenta uma compilação das perdas ativas e reativas em cada linha de cada sistema. Por padrão os valores do MATPOWER são apresentados com prefixo mega, já no OpenDSS são apresentados com o prefixo kilo.

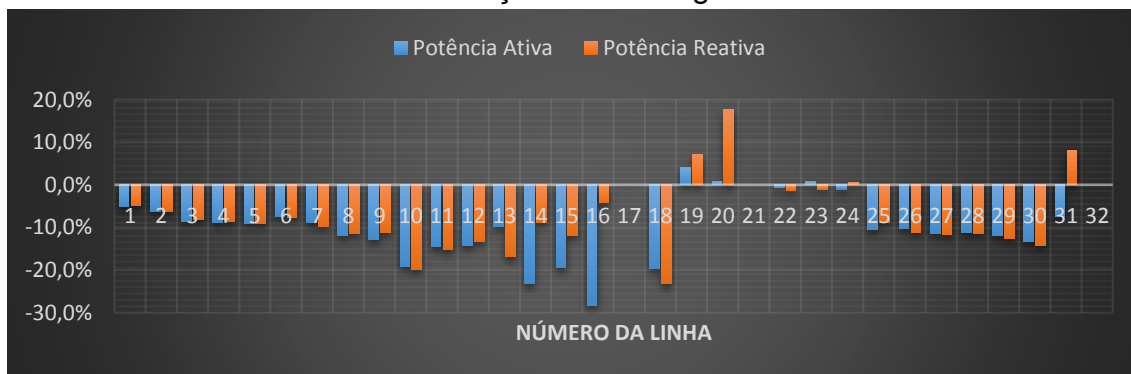
Tabela 2 - Perdas ativas e reativas dos circuitos

Linha	MATPOWER		OpenDSS		Linha	MATPOWER		OpenDSS	
	P(MW)	Q(MVar)	P(kW)	Q(kVar)		P(MW)	Q(MVar)	P(kW)	Q(kVar)
1	0,0122	0,0062	11,5668	5,8963	17	ND*	ND*	0,0454	0,0356
2	0,0518	0,0264	48,5896	24,7482	18	0,0002	0,0002	0,1609	0,1536
3	0,0199	0,0101	18,2050	9,2716	19	0,0008	0,0007	0,8320	0,7497
4	0,0187	0,0095	17,0254	8,6713	20	0,0001	0,0001	0,1007	0,1177
5	0,0382	0,0330	34,7436	29,9923	21	ND*	ND*	0,0436	0,0577
6	0,0019	0,0063	1,7595	5,8161	22	0,0032	0,0022	3,1774	2,1711
7	0,0048	0,0016	4,3722	1,4449	23	0,0051	0,0041	5,1368	4,0563
8	0,0042	0,0030	3,7012	2,6591	24	0,0013	0,0010	1,2857	1,0060
9	0,0036	0,0025	3,1347	2,2219	25	0,0026	0,0013	2,3269	1,1852
10	0,0006	0,0002	0,4854	0,1605	26	0,0033	0,0017	2,9633	1,5087
11	0,0009	0,0003	0,7693	0,2544	27	0,0113	0,0100	10,0101	8,8257
12	0,0027	0,0021	2,3149	1,8213	28	0,0078	0,0068	6,9209	6,0293
13	0,0007	0,0010	0,6312	0,8308	29	0,0039	0,0020	3,4329	1,7486
14	0,0004	0,0003	0,3073	0,2735	30	0,0016	0,0016	1,3871	1,3708
15	0,0003	0,0002	0,2416	0,1764	31	0,0002	0,0002	0,1853	0,2159
16	0,0003	0,0003	0,2153	0,2875	32	ND*	ND*	0,0114	0,0178
Total						0,203	0,135	186,1	123,8

Fonte: Do autor, com base nos dados Apêndice B (* Não disponível)

O gráfico 12 apresenta a divergência percentual de perdas de potência ativa e reativa em relação a rede original, isto é, qual a proporção que a potência ativa e reativa referente a perdas técnicas de cada circuito da rede convertida está maior ou menor que a rede original.

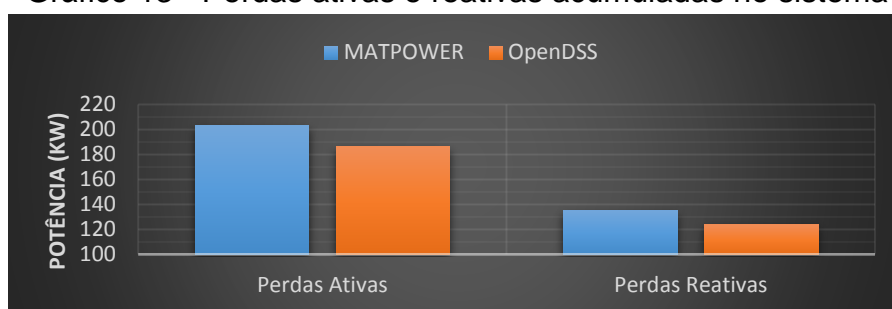
Gráfico 12 - Divergência percentual de perdas de potência da rede convertida em relação a rede original



Fonte: Do autor

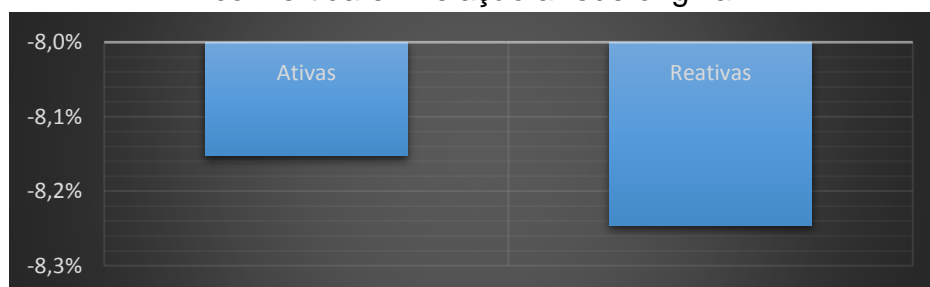
O gráfico 13 apresenta as perdas de potência ativa e reativa de todo sistema, isto é, a soma das perdas de potência de todos circuitos que compõe a rede. A rede original apresentou uma perda de 203kW e 135kVar. Na rede convertida foi de 186kW e 124kVar. O gráfico 14 apresenta a divergência percentual de perdas acumuladas de potência ativa e reativa em relação a rede original. Assim a rede convertida apresentou uma diferença de -8,15% de perdas ativas e de -8,25% de perdas reativas em relação a rede original.

Gráfico 13 - Perdas ativas e reativas acumuladas no sistema



Fonte: Do autor

Gráfico 14 - Divergência percentual de perdas de potência acumulada da rede convertida em relação a rede original



Fonte: Do autor

As divergências apresentadas nos gráficos 12 e 14 estão relacionados a erros de resolução entre a disposição dos resultados das ferramentas. Com uma maior resolução, o OpenDSS entrega valores com uma precisão mais elevada para o usuário. Assim considera-se que as perdas de potência do sistema estão dentro de valores aceitáveis.

Não foi encontrado na literatura acadêmica outras redes de distribuição conhecidas na IEEE no formato do MATPOWER para realização de novos procedimentos, julgando-se a utilização da rede de 33 barras suficiente para validar a ferramenta através dos resultados obtidos.

5. CONCLUSÕES

No sistema elétrico Brasileiro, as empresas que controlam as redes de distribuição utilizam softwares no auxílio da operação das mesmas e são realizados estudos como o fluxo de potência. Os modelos de redes gerados por esses softwares, entretanto, não são compatíveis entre si, o que impossibilita a portabilidade direta de uma rede de distribuição de uma plataforma de software para outra.

Tratando do problema da falta de compatibilidade entre os modelos de sistemas elétricos de potência gerados por diferentes ferramentas de software, esse trabalho definiu o objetivo de converter redes elétricas no padrão do sistema MATPOWER para o sistema OpenDSS e foi alcançado através do desenvolvimento da ferramenta DumpDSS. Esta por sua vez cria elementos no padrão OpenDSS gerando a estrutura necessária da rede elétrica utilizando como base os dados da rede do sistema MATPOWER, efetuando assim a conversão fiel da rede original.

A validação do DumpDSS iniciou com a conversão da rede de distribuição de 33 barras, posteriormente através da análise comparativa do fluxo de potência entre a original sendo executando o fluxo no MATPOWER, e a rede convertida pelo DumpDSS e sendo executado o fluxo no OpenDSS, obtendo resultados satisfatórios.

Na análise dos resultados é observado uma divergência em todas medições. Isto se dá principalmente pela diferença de resolução na amostragem dos valores do fluxo de potência dentre as ferramentas. Outra possível causa, mas com menor magnitude, é a diferença na execução do método do fluxo de potência em cada ferramenta, pois podem haver pequenas variações na implementação que possam causar diferenças de valores. Entretanto essas divergências podem ser desprezadas devido ao seu valor reduzido em relação aos valores absolutos observados. Assim considera-se os valores do sistema estão dentro dos limites aceitáveis e suficientemente precisos.

Propõe-se para trabalhos futuros abranger novas plataformas como ANAREDE, CYME⁶, entre outros. Também efetuar o processo inverso, convertendo redes do OpenDSS para outras plataformas.

⁶ <http://www.cyme.com/software/cymecymflow/>

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Nota Técnica nº 0057/2014-SRD/ANEEL - **Aprimoramento da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição do PRODIST.** – 2014. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0057_srd.pdf >. Acesso em: 19 abr. 2018.
- EPRI. **Reference Guide - The Open Distribution System Simulator (OpenDSS).** – 2018. Disponível em: <http://svn.code.sf.net/p/electricdss/code/trunk/Distrib/Doc/OpenDSSManual.pdf> >. Acesso em: 19 abr. 2018.
- LEMOS, João Ricardo Ferreira. **Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transitórios eletromecânicos.** Rio de Janeiro, 2008. Monografia para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001145.pdf> >. Acesso em: 16 mai. 2018.
- BARAN, Mesut; WU, Felix. **Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/61.25627> >. Acesso em: 31 ago. 2018.
- MONTICELLI, Alcir. **Introdução a sistemas de energia elétrica.** Alcir Monticelli e Ariovaldo Garcia. 2ª edição – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2011.
- MOURA, Adriano Aron Freitas de. **Novo método e modelos para estudos de fluxo de potência e de curto-circuito** / Adriano Aron - Freitas de Moura. – 2013.
- PAIVA, José Pedro Sucena. **Redes de energia eléctrica: uma análise sistémica.** 3ª ed. Lisboa: IFT PRESS, 2011.
- PINTO, Milton de Oliveira. **Energia Elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados** / Milton de Oliveira Pinto. – 1. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- ROBBA, Ernesto João Robba. **Introdução a sistemas elétricos de potência – Componentes simétricas.** Carlos César Barioni de Oliveira, Hernán Prieto Schmidt, Nelson Kagan, Ernesto João Robba – 2ª edição rev. e ampl. – São Paulo: Blucher, 2000.
- ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência** / Luiz Cera Zanetta Jr – 1. ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência** / Luiz Cera Zanetta Jr – São Paulo: Editora da Universidade de São paulo, 2003.

ZIMMERMAN, Ray Daniel; MURILLO-SÁNCHEZ, Carlos E. **MATPOWER User's Manual – Version 6.0**. 2016. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/MATPOWER-manual.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

ZIMMERMAN, Ray Daniel; MURILLO-SÁNCHEZ, Carlos E. **MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051168>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

APÊNDICE A – ARQUIVOS GERADOS REDE 33 BARRAS

No processo de conversão são gerados dois arquivos. O primeiro arquivo com extensão “.dss” que corresponde a rede e o segundo arquivo com extensão “.txt” que corresponde ao arquivo de comentários e informações.

Arquivo “.dss”

```
// DumpDSS - Trabalho de Conclusão de Curso - ENG. Elétrica Univates 2018B //
// Aluno: Tiago Scapin - Orientador: Prof.Me.Augusto Simon //
// Rede convertida do arquivo case33bw.m em 13/11/2018 11:27:13
```

```
clear
```

```
New circuit.case33bw bus1=barra1 basekv=12.66 pu=1 baseMVA=100 Angle=-30
~ Z0=[0.000000001 , 0.000000001] Z1=[0.000000001 , 0.000000001]
```

```
New Line.linha1 phases=3 bus1=barra1 bus2=barra2 length=1.0 units=km
~ r1=0.0922 x1=0.0470 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha2 phases=3 bus1=barra2 bus2=barra3 length=1.0 units=km
~ r1=0.4930 x1=0.2511 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha3 phases=3 bus1=barra3 bus2=barra4 length=1.0 units=km
~ r1=0.3660 x1=0.1864 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha4 phases=3 bus1=barra4 bus2=barra5 length=1.0 units=km
~ r1=0.3811 x1=0.1941 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha5 phases=3 bus1=barra5 bus2=barra6 length=1.0 units=km
~ r1=0.8190 x1=0.7070 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha6 phases=3 bus1=barra6 bus2=barra7 length=1.0 units=km
~ r1=0.1872 x1=0.6188 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha7 phases=3 bus1=barra7 bus2=barra8 length=1.0 units=km
~ r1=0.7114 x1=0.2351 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha8 phases=3 bus1=barra8 bus2=barra9 length=1.0 units=km
~ r1=1.0300 x1=0.7400 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha9 phases=3 bus1=barra9 bus2=barra10 length=1.0 units=km
~ r1=1.0440 x1=0.7400 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha10 phases=3 bus1=barra10 bus2=barra11 length=1.0 units=km
~ r1=0.1966 x1=0.0650 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha11 phases=3 bus1=barra11 bus2=barra12 length=1.0 units=km
~ r1=0.3744 x1=0.1238 b1=0
~ enable=true
```

```
New Line.linha12 phases=3 bus1=barra12 bus2=barra13 length=1.0 units=km
~ r1=1.4680 x1=1.1550 b1=0
~ enable=true
```


New Line.linha13 phases=3 bus1=barra13 bus2=barra14 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.5416 x1=0.7129 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha14 phases=3 bus1=barra14 bus2=barra15 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.5910 x1=0.5260 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha15 phases=3 bus1=barra15 bus2=barra16 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.7463 x1=0.5450 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha16 phases=3 bus1=barra16 bus2=barra17 length=1.0 units=km
 ~ r1=1.2890 x1=1.7210 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha17 phases=3 bus1=barra17 bus2=barra18 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.7320 x1=0.5740 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha18 phases=3 bus1=barra2 bus2=barra19 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.1640 x1=0.1565 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha19 phases=3 bus1=barra19 bus2=barra20 length=1.0 units=km
 ~ r1=1.5042 x1=1.3554 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha20 phases=3 bus1=barra20 bus2=barra21 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.4095 x1=0.4784 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha21 phases=3 bus1=barra21 bus2=barra22 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.7089 x1=0.9373 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha22 phases=3 bus1=barra3 bus2=barra23 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.4512 x1=0.3083 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha23 phases=3 bus1=barra23 bus2=barra24 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.8980 x1=0.7091 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha24 phases=3 bus1=barra24 bus2=barra25 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.8960 x1=0.7011 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha25 phases=3 bus1=barra6 bus2=barra26 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.2030 x1=0.1034 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha26 phases=3 bus1=barra26 bus2=barra27 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.2842 x1=0.1447 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha27 phases=3 bus1=barra27 bus2=barra28 length=1.0 units=km
 ~ r1=1.0590 x1=0.9337 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha28 phases=3 bus1=barra28 bus2=barra29 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.8042 x1=0.7006 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha29 phases=3 bus1=barra29 bus2=barra30 length=1.0 units=km
 ~ r1=0.5075 x1=0.2585 b1=0
 ~ enable=true

New Line.linha30 phases=3 bus1=barra30 bus2=barra31 length=1.0 units=km

~ r1=0.9744 x1=0.9630 b1=0
~ enable=true

New Line.linha31 phases=3 bus1=barra31 bus2=barra32 length=1.0 units=km
~ r1=0.3105 x1=0.3619 b1=0
~ enable=true

New Line.linha32 phases=3 bus1=barra32 bus2=barra33 length=1.0 units=km
~ r1=0.3410 x1=0.5302 b1=0
~ enable=true

New Line.linha33 phases=3 bus1=barra21 bus2=barra8 length=1.0 units=km
~ r1=2.0000 x1=2.0000 b1=0
~ enable=false

New Line.linha34 phases=3 bus1=barra9 bus2=barra15 length=1.0 units=km
~ r1=2.0000 x1=2.0000 b1=0
~ enable=false

New Line.linha35 phases=3 bus1=barra12 bus2=barra22 length=1.0 units=km
~ r1=2.0000 x1=2.0000 b1=0
~ enable=false

New Line.linha36 phases=3 bus1=barra18 bus2=barra33 length=1.0 units=km
~ r1=0.5000 x1=0.5000 b1=0
~ enable=false

New Line.linha37 phases=3 bus1=barra25 bus2=barra29 length=1.0 units=km
~ r1=0.5000 x1=0.5000 b1=0
~ enable=false

New Load.cargaBarra2_pc phases=3 model=1 bus=barra2 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=100 kvar=60

New Load.cargaBarra3_pc phases=3 model=1 bus=barra3 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=90 kvar=40

New Load.cargaBarra4_pc phases=3 model=1 bus=barra4 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=120 kvar=80

New Load.cargaBarra5_pc phases=3 model=1 bus=barra5 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=30

New Load.cargaBarra6_pc phases=3 model=1 bus=barra6 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=20

New Load.cargaBarra7_pc phases=3 model=1 bus=barra7 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=200 kvar=100

New Load.cargaBarra8_pc phases=3 model=1 bus=barra8 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=200 kvar=100

New Load.cargaBarra9_pc phases=3 model=1 bus=barra9 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=20

New Load.cargaBarra10_pc phases=3 model=1 bus=barra10 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=20

New Load.cargaBarra11_pc phases=3 model=1 bus=barra11 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=45 kvar=30

New Load.cargaBarra12_pc phases=3 model=1 bus=barra12 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=35

New Load.cargaBarra13_pc phases=3 model=1 bus=barra13 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=35

New Load.cargaBarra14_pc phases=3 model=1 bus=barra14 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=120 kvar=80

New Load.cargaBarra15_pc phases=3 model=1 bus=barra15 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=10

New Load.cargaBarra16_pc phases=3 model=1 bus=barra16 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=20

New Load.cargaBarra17_pc phases=3 model=1 bus=barra17 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=20

New Load.cargaBarra18_pc phases=3 model=1 bus=barra18 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=90 kvar=40

New Load.cargaBarra19_pc phases=3 model=1 bus=barra19 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=90 kvar=40

New Load.cargaBarra20_pc phases=3 model=1 bus=barra20 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=90 kvar=40

New Load.cargaBarra21_pc phases=3 model=1 bus=barra21 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=90 kvar=40

New Load.cargaBarra22_pc phases=3 model=1 bus=barra22 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=90 kvar=40

New Load.cargaBarra23_pc phases=3 model=1 bus=barra23 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=90 kvar=50

New Load.cargaBarra24_pc phases=3 model=1 bus=barra24 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=420 kvar=200

New Load.cargaBarra25_pc phases=3 model=1 bus=barra25 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=420 kvar=200

New Load.cargaBarra26_pc phases=3 model=1 bus=barra26 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=25

New Load.cargaBarra27_pc phases=3 model=1 bus=barra27 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=25

New Load.cargaBarra28_pc phases=3 model=1 bus=barra28 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=20

New Load.cargaBarra29_pc phases=3 model=1 bus=barra29 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=120 kvar=70

New Load.cargaBarra30_pc phases=3 model=1 bus=barra30 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=200 kvar=600

New Load.cargaBarra31_pc phases=3 model=1 bus=barra31 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=150 kvar=70

New Load.cargaBarra32_pc phases=3 model=1 bus=barra32 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=210 kvar=100

New Load.cargaBarra33_pc phases=3 model=1 bus=barra33 conn=delta
~ kv=12.66 pu=1 kw=60 kvar=40

New Generator.gen1_barra1 bus1=barra1 phases=3 kv=12.66 model=3
~ maxkvar=10 minkvar=-10

Set VoltageBases=[12.66]
CalcVoltageBases

Solve
Show Voltages LL Nodes
Show Powers kVA

Arquivo “.txt”

```
// DumpDSS - Trabalho de Conclusão de Curso - ENG.Elétrica Univates 2018B //
// Aluno: Tiago Scapin - Orientador: Prof.Me.Augusto Simon //
// Arquivo de informações extraídas do arquivo original case33bw.m em 13/11/2018 11:27:13
```

```
#####
```

```
##### COMENTÁRIOS OBTIDOS DO ARQUIVO ORIGINAL #####
```

```
##### COMENTÁRIOS ANTES DO MPC.VERSION #####
```

```
%CASE33BW Power flow data for 33 bus distribution system from Baran & Wu
```

```
% Please see CASEFORMAT for details on the case file format.
```

```
%
```

```
% Data from ...
```

```
% M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution
```

```
% systems for loss reduction and load balancing," in IEEE Transactions
```

```
% on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989.
```

```
% doi: 10.1109/61.25627
```

```
% URL: http://doi.org/10.1109/61.25627
```

```
%% MATPOWER Case Format : Version 2
```

```
##### COMENTÁRIOS ANTES DO MPC.BASEMVA #####
```

```
%%----- Power Flow Data -----%%
```

```
%% system MVA base
```

```
##### COMENTÁRIOS ANTES DO MPC.BUS #####
```

```
%% bus data
```

```
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone
% Vmax Vmin
```

```
mpc.bus = [ %% (Pd and Qd are specified in kW & kVAr here, converted to MW & MVar below)
```

```
##### COMENTÁRIOS ANTES DO MPC.GEN #####
```

```
%% generator data
```

```
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1
% Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
```

```
##### COMENTÁRIOS ANTES DO MPC.BRANCH #####
```

```
%% branch data
```

```
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
% angmin angmax
```

```
mpc.branch = [ %% (r and x specified in ohms here, converted to p.u. below)
```

```
##### COMENTÁRIOS ANTES DO MPC.GENCOST #####
```

```
%%----- OPF Data -----%%
```

```
%% generator cost data
```

```
% 1 startup shutdown n x1 y1 ... xn yn
% 2 startup shutdown n c(n-1) ... c0
```

```
##### COMENTÁRIOS NO FINAL DO ARQUIVO #####
```

```
%% convert branch impedances from Ohms to p.u.
```

```
Vbase = mpc.bus(1, BASE_KV) * 1e3; %% in Volts
```

```
Sbase = mpc.baseMVA * 1e6; %% in VA
```

```
%% convert loads from kW to MW
```

```
#####
```

```
##### DADOS NÃO UTILIZADOS #####
```

```
##### DADOS DO MPC.GENCOST #####
```

```
%%----- OPF Data -----%%
```

```
%% generator cost data
```

```
% 1 startup shutdown n x1 y1 ... xn yn
% 2 startup shutdown n c(n-1) ... c0
```

```
2 0 0 3 0 20 0
```

```
#####
```

APÊNDICE B – ARQUIVOS DE SAÍDA REDE 33 BARRAS

Neste apêndice se encontram os arquivos de saída apresentando o resultado do fluxo de potência da rede de 33 barras. O primeiro arquivo é referente a rede original executado no MATPOWER, nele se encontram todas informações do fluxo de potência. Os demais arquivos são referentes a rede convertida gerados após a execução do fluxo de potência no OpenDSS. São divididos em três arquivos, onde são apresentadas as tensões das barras, fluxo de potência nas linhas e as perdas sucessivamente.

Arquivo de saída do MATPOWER

```
>> runpf('case33bw')
```

MATPOWER Version 6.0, 16-Dec-2016 -- AC Power Flow (Newton)

Newton's method power flow converged in 3 iterations.

Converged in 0.05 seconds

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	33	Total Gen Capacity	10.0	-10.0 to 10.0
Generators	1	On-line Capacity	10.0	-10.0 to 10.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	3.9	2.4
Loads	32	Load	3.7	2.3
Fixed	32	Fixed	3.7	2.3
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	37	Losses (I^2 * Z)	0.20	0.14
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum		Maximum
Voltage Magnitude		0.913 p.u. @ bus 18		1.000 p.u. @ bus 1
Voltage Angle		-0.50 deg @ bus 18		0.50 deg @ bus 30
P Losses (I^2*R)		-		0.05 MW @ line 2-3
Q Losses (I^2*X)		-		0.03 MVar @ line 5-6
Bus Data				

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.000	0.000*	3.92	2.44	-	-
2	0.997	0.014	-	-	0.10	0.06
3	0.983	0.096	-	-	0.09	0.04
4	0.975	0.162	-	-	0.12	0.08
5	0.968	0.228	-	-	0.06	0.03
6	0.950	0.134	-	-	0.06	0.02
7	0.946	-0.096	-	-	0.20	0.10
8	0.941	-0.060	-	-	0.20	0.10
9	0.935	-0.133	-	-	0.06	0.02
10	0.929	-0.196	-	-	0.06	0.02
11	0.928	-0.189	-	-	0.04	0.03
12	0.927	-0.177	-	-	0.06	0.04
13	0.921	-0.269	-	-	0.06	0.04
14	0.919	-0.347	-	-	0.12	0.08
15	0.917	-0.385	-	-	0.06	0.01
16	0.916	-0.408	-	-	0.06	0.02
17	0.914	-0.485	-	-	0.06	0.02
18	0.913	-0.495	-	-	0.09	0.04
19	0.997	0.004	-	-	0.09	0.04
20	0.993	-0.063	-	-	0.09	0.04
21	0.992	-0.083	-	-	0.09	0.04
22	0.992	-0.103	-	-	0.09	0.04
23	0.979	0.065	-	-	0.09	0.05
24	0.973	-0.024	-	-	0.42	0.20
25	0.969	-0.067	-	-	0.42	0.20
26	0.948	0.173	-	-	0.06	0.03
27	0.945	0.229	-	-	0.06	0.03
28	0.934	0.312	-	-	0.06	0.02
29	0.926	0.390	-	-	0.12	0.07
30	0.922	0.496	-	-	0.20	0.60
31	0.918	0.411	-	-	0.15	0.07
32	0.917	0.388	-	-	0.21	0.10
33	0.917	0.380	-	-	0.06	0.04

Total:			3.92	2.44	3.72	2.30

=====									
Branch Data									
=====									
Brnch #	From Bus	To Bus	From P (MW)	From Q (MVar)	Injection P (MW)	Injection Q (MVar)	To Bus P (MW)	To Bus Q (MVar)	Loss (I ² * Z)

1	1	2	3.92	2.44	-3.91	-2.43	0.012	0.01	
2	2	3	3.44	2.21	-3.39	-2.18	0.052	0.03	
3	3	4	2.36	1.68	-2.34	-1.67	0.020	0.01	
4	4	5	2.22	1.59	-2.20	-1.58	0.019	0.01	
5	5	6	2.14	1.55	-2.11	-1.52	0.038	0.03	
6	6	7	1.10	0.53	-1.09	-0.52	0.002	0.01	
7	7	8	0.89	0.42	-0.89	-0.42	0.005	0.00	

8	8	9	0.69	0.32	-0.68	-0.32	0.004	0.00
9	9	10	0.62	0.30	-0.62	-0.29	0.004	0.00
10	10	11	0.56	0.27	-0.56	-0.27	0.001	0.00
11	11	12	0.52	0.24	-0.51	-0.24	0.001	0.00
12	12	13	0.45	0.21	-0.45	-0.21	0.003	0.00
13	13	14	0.39	0.17	-0.39	-0.17	0.001	0.00
14	14	15	0.27	0.09	-0.27	-0.09	0.000	0.00
15	15	16	0.21	0.08	-0.21	-0.08	0.000	0.00
16	16	17	0.15	0.06	-0.15	-0.06	0.000	0.00
17	17	18	0.09	0.04	-0.09	-0.04	0.000	0.00
18	2	19	0.36	0.16	-0.36	-0.16	0.000	0.00
19	19	20	0.27	0.12	-0.27	-0.12	0.001	0.00
20	20	21	0.18	0.08	-0.18	-0.08	0.000	0.00
21	21	22	0.09	0.04	-0.09	-0.04	0.000	0.00
22	3	23	0.94	0.46	-0.94	-0.46	0.003	0.00
23	23	24	0.85	0.41	-0.84	-0.40	0.005	0.00
24	24	25	0.42	0.20	-0.42	-0.20	0.001	0.00
25	6	26	0.95	0.97	-0.95	-0.97	0.003	0.00
26	26	27	0.89	0.95	-0.88	-0.95	0.003	0.00
27	27	28	0.82	0.92	-0.81	-0.91	0.011	0.01
28	28	29	0.75	0.89	-0.75	-0.88	0.008	0.01
29	29	30	0.63	0.81	-0.62	-0.81	0.004	0.00
30	30	31	0.42	0.21	-0.42	-0.21	0.002	0.00
31	31	32	0.27	0.14	-0.27	-0.14	0.000	0.00
32	32	33	0.06	0.04	-0.06	-0.04	0.000	0.00
33	21	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
34	9	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
35	12	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
36	18	33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
37	25	29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00

Total: 0.203 0.14

>>

Arquivo de saída do OpenDSS - TENSÕES

LINE-LINE VOLTAGES BY BUS & NODE

Bus	Node	VLN (kV)	Angle	pu	Base kV
BARRA1	1-2	12.66 /_	0.0	1	12.660
-	2-3	12.66 /_ -120.0		1	12.660
-	3-1	12.66 /_ 120.0		1	12.660
BARRA2	1-2	12.623 /_	0.0	0.99711	12.660
-	2-3	12.623 /_ -120.0		0.99711	12.660
-	3-1	12.623 /_ 120.0		0.99711	12.660
BARRA3	1-2	12.451 /_	0.1	0.98346	12.660
-	2-3	12.451 /_ -119.9		0.98346	12.660
-	3-1	12.451 /_ 120.1		0.98346	12.660
BARRA4	1-2	12.36 /_	0.2	0.9763	12.660
-	2-3	12.36 /_ -119.8		0.9763	12.660
-	3-1	12.36 /_ 120.2		0.9763	12.660
BARRA5	1-2	12.271 /_	0.2	0.96924	12.660
-	2-3	12.271 /_ -119.8		0.96924	12.660
-	3-1	12.271 /_ 120.2		0.96924	12.660
BARRA6	1-2	12.049 /_	0.1	0.95171	12.660
-	2-3	12.049 /_ -119.9		0.95171	12.660
-	3-1	12.049 /_ 120.1		0.95171	12.660
BARRA7	1-2	12.006 /_	-0.1	0.94836	12.660
-	2-3	12.006 /_ -120.1		0.94836	12.660
-	3-1	12.006 /_ 119.9		0.94836	12.660
BARRA8	1-2	11.948 /_	-0.1	0.94376	12.660
-	2-3	11.948 /_ -120.1		0.94376	12.660
-	3-1	11.948 /_ 119.9		0.94376	12.660
BARRA9	1-2	11.873 /_	-0.1	0.93786	12.660
-	2-3	11.873 /_ -120.1		0.93786	12.660
-	3-1	11.873 /_ 119.9		0.93786	12.660
BARRA10	1-2	11.804 /_	-0.2	0.9324	12.660
-	2-3	11.804 /_ -120.2		0.9324	12.660
-	3-1	11.804 /_ 119.8		0.9324	12.660
BARRA11	1-2	11.794 /_	-0.2	0.9316	12.660
-	2-3	11.794 /_ -120.2		0.9316	12.660
-	3-1	11.794 /_ 119.8		0.9316	12.660
BARRA12	1-2	11.776 /_	-0.2	0.9302	12.660
-	2-3	11.776 /_ -120.2		0.9302	12.660
-	3-1	11.776 /_ 119.8		0.9302	12.660
BARRA13	1-2	11.704 /_	-0.3	0.9245	12.660
-	2-3	11.704 /_ -120.3		0.9245	12.660
-	3-1	11.704 /_ 119.7		0.9245	12.660
BARRA14	1-2	11.677 /_	-0.3	0.92239	12.660
-	2-3	11.677 /_ -120.3		0.92239	12.660
-	3-1	11.677 /_ 119.7		0.92239	12.660
BARRA15	1-2	11.661 /_	-0.4	0.92108	12.660
-	2-3	11.661 /_ -120.4		0.92108	12.660
-	3-1	11.661 /_ 119.6		0.92108	12.660
BARRA16	1-2	11.645 /_	-0.4	0.91981	12.660
-	2-3	11.645 /_ -120.4		0.91981	12.660

- 3-1 11.645 /_ 119.6 0.91981 12.660
 BARRA17 1-2 11.621 /_ -0.5 0.91794 12.660
 - 2-3 11.621 /_ -120.5 0.91794 12.660
 - 3-1 11.621 /_ 119.5 0.91794 12.660
 BARRA18 1-2 11.614 /_ -0.5 0.91738 12.660
 - 2-3 11.614 /_ -120.5 0.91738 12.660
 - 3-1 11.614 /_ 119.5 0.91738 12.660
 BARRA19 1-2 12.617 /_ 0.0 0.99659 12.660
 - 2-3 12.617 /_ -120.0 0.99659 12.660
 - 3-1 12.617 /_ 120.0 0.99659 12.660
 BARRA20 1-2 12.571 /_ -0.1 0.99301 12.660
 - 2-3 12.571 /_ -120.1 0.99301 12.660
 - 3-1 12.571 /_ 119.9 0.99301 12.660
 BARRA21 1-2 12.563 /_ -0.1 0.9923 12.660
 - 2-3 12.563 /_ -120.1 0.9923 12.660
 - 3-1 12.563 /_ 119.9 0.9923 12.660
 BARRA22 1-2 12.555 /_ -0.1 0.99167 12.660
 - 2-3 12.555 /_ -120.1 0.99167 12.660
 - 3-1 12.555 /_ 119.9 0.99167 12.660
 BARRA23 1-2 12.405 /_ 0.1 0.97988 12.660
 - 2-3 12.405 /_ -119.9 0.97988 12.660
 - 3-1 12.405 /_ 120.1 0.97988 12.660
 BARRA24 1-2 12.321 /_ 0.0 0.97321 12.660
 - 2-3 12.321 /_ -120.0 0.97321 12.660
 - 3-1 12.321 /_ 120.0 0.97321 12.660
 BARRA25 1-2 12.279 /_ -0.1 0.96989 12.660
 - 2-3 12.279 /_ -120.1 0.96989 12.660
 - 3-1 12.279 /_ 119.9 0.96989 12.660
 BARRA26 1-2 12.025 /_ 0.2 0.94988 12.660
 - 2-3 12.025 /_ -119.8 0.94988 12.660
 - 3-1 12.025 /_ 120.2 0.94988 12.660
 BARRA27 1-2 11.995 /_ 0.2 0.94746 12.660
 - 2-3 11.995 /_ -119.8 0.94746 12.660
 - 3-1 11.995 /_ 120.2 0.94746 12.660
 BARRA28 1-2 11.859 /_ 0.3 0.93669 12.660
 - 2-3 11.859 /_ -119.7 0.93669 12.660
 - 3-1 11.859 /_ 120.3 0.93669 12.660
 BARRA29 1-2 11.761 /_ 0.4 0.92897 12.660
 - 2-3 11.761 /_ -119.6 0.92897 12.660
 - 3-1 11.761 /_ 120.4 0.92897 12.660
 BARRA30 1-2 11.719 /_ 0.5 0.92564 12.660
 - 2-3 11.719 /_ -119.5 0.92564 12.660
 - 3-1 11.719 /_ 120.5 0.92564 12.660
 BARRA31 1-2 11.669 /_ 0.4 0.92175 12.660
 - 2-3 11.669 /_ -119.6 0.92175 12.660
 - 3-1 11.669 /_ 120.4 0.92175 12.660
 BARRA32 1-2 11.659 /_ 0.4 0.9209 12.660
 - 2-3 11.659 /_ -119.6 0.9209 12.660
 - 3-1 11.659 /_ 120.4 0.9209 12.660
 BARRA33 1-2 11.655 /_ 0.4 0.92064 12.660
 - 2-3 11.655 /_ -119.6 0.92064 12.660
 - 3-1 11.655 /_ 120.4 0.92064 12.660

"Line.LINHA14"	2	-252.2	-84.3	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0			
"Line.LINHA15"	1	196.0	74.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA15"	2	-195.7	-74.8	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0			
"Line.LINHA16"	1	139.7	56.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA16"	2	-139.5	-55.8	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA17"	1	83.6	37.2	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA17"	2	-83.6	-37.2	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA18"	1	361.1	161.1	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA18"	2	-361.0	-160.9	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA19"	1	271.0	120.9	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA19"	2	-270.1	-120.2	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA20"	1	180.1	80.2	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA20"	2	-180.0	-80.1	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA21"	1	90.0	40.1	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA21"	2	-90.0	-40.0	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA22"	1	939.5	457.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA22"	2	-936.3	-455.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0			
"Line.LINHA23"	1	846.3	405.0	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA23"	2	-841.2	-401.0	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA24"	1	421.2	201.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA24"	2	-419.9	-200.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0			
"Line.LINHA25"	1	902.5	921.7	0.0	0.0	-0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA25"	2	-900.1	-920.5	-0.0	-0.0	0.0	0.0			
"Line.LINHA26"	1	840.2	895.5	0.0	0.0	-0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA26"	2	-837.2	-894.0	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA27"	1	777.5	869.1	0.0	0.0	-0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA27"	2	-767.5	-860.3	-0.0	-0.0	0.0	0.0			
"Line.LINHA28"	1	709.3	840.9	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA28"	2	-702.4	-834.9	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA29"	1	587.9	768.1	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA29"	2	-584.5	-766.4	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			
"Line.LINHA30"	1	395.1	198.4	0.0	0.0	-0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA30"	2	-393.7	-197.0	-0.0	-0.0	0.0	0.0			
"Line.LINHA31"	1	253.0	131.3	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA31"	2	-252.8	-131.1	-0.0	-0.0	0.0	-0.0			

"Line.LINHA32"	1	56.2	37.5	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0										
"Line.LINHA32"	2	-56.2	-37.4	-0.0	-0.0	0.0	0.0			
"Load.CARGABARRA2_PC"	1	100.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA3_PC"	1	90.0	40.0	0.0	0.0	0.0	-0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA4_PC"	1	120.0	80.0	0.0	0.0	0.0	-0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA5_PC"	1	60.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA6_PC"	1	60.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA7_PC"	1	199.3	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA8_PC"	1	197.2	98.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA9_PC"	1	58.4	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA10_PC"	1	57.7	19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA11_PC"	1	43.2	28.8	0.0	0.0	-0.0	0.0			
"Load.CARGABARRA12_PC"	1	57.4	33.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA13_PC"	1	56.7	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA14_PC"	1	112.8	75.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA15_PC"	1	56.2	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA16_PC"	1	56.0	18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA17_PC"	1	55.8	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA18_PC"	1	83.6	37.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA19_PC"	1	90.0	40.0	0.0	0.0	-0.0	0.0			
"Load.CARGABARRA20_PC"	1	90.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA21_PC"	1	90.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA22_PC"	1	90.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA23_PC"	1	90.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA24_PC"	1	420.0	200.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA25_PC"	1	420.0	200.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA26_PC"	1	60.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA27_PC"	1	59.7	24.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA28_PC"	1	58.2	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA29_PC"	1	114.5	66.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA30_PC"	1	189.3	568.0	0.0	0.0	-0.0	0.0			
"Load.CARGABARRA31_PC"	1	140.7	65.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA32_PC"	1	196.7	93.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Load.CARGABARRA33_PC"	1	56.2	37.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
"Generator.GEN1_BARRA1"	1	-1000.0	-10.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0		

Total Circuit Losses = 186.1 +j 123.8

Arquivo de saída do OpenDSS - PERDAS

LOSSES REPORT

Power Delivery Element Loss Report

Element	kW Losses	% of Power	kvar Losses
"Line.LINHA1"	11.56679,	0.30	5.8963
"Line.LINHA2"	48.58956,	1.45	24.7482
"Line.LINHA3"	18.20502,	0.80	9.27163
"Line.LINHA4"	17.02543,	0.80	8.67131
"Line.LINHA5"	34.74357,	1.70	29.9923
"Line.LINHA6"	1.75949,	0.17	5.81609
"Line.LINHA7"	4.37217,	0.51	1.44489
"Line.LINHA8"	3.70117,	0.57	2.65909
"Line.LINHA9"	3.13472,	0.53	2.22193
"Line.LINHA10"	0.48537,	0.09	0.160473
"Line.LINHA11"	0.76929,	0.16	0.254374
"Line.LINHA12"	2.31488,	0.54	1.82131
"Line.LINHA13"	0.63118,	0.17	0.830812
"Line.LINHA14"	0.30727,	0.12	0.273477
"Line.LINHA15"	0.24158,	0.12	0.176415
"Line.LINHA16"	0.21533,	0.15	0.287492
"Line.LINHA17"	0.04542,	0.05	0.0356172
"Line.LINHA18"	0.16092,	0.04	0.153565
"Line.LINHA19"	0.83202,	0.31	0.749714
"Line.LINHA20"	0.10074,	0.06	0.117689
"Line.LINHA21"	0.04363,	0.05	0.0576821
"Line.LINHA22"	3.17744,	0.34	2.17111
"Line.LINHA23"	5.13683,	0.61	4.05626
"Line.LINHA24"	1.28570,	0.31	1.00603
"Line.LINHA25"	2.32686,	0.26	1.18521
"Line.LINHA26"	2.96325,	0.35	1.50874
"Line.LINHA27"	10.01010,	1.29	8.82571
"Line.LINHA28"	6.92087,	0.98	6.0293
"Line.LINHA29"	3.43289,	0.58	1.74857
"Line.LINHA30"	1.38706,	0.35	1.37083
"Line.LINHA31"	0.18527,	0.07	0.215945
"Line.LINHA32"	0.01143,	0.02	0.0177765

LINE LOSSES= 186.1 kW

TRANSFORMER LOSSES= 0.0 kW

TOTAL LOSSES= 186.1 kW

TOTAL LOAD POWER = 3629.4 kW

Percent Losses for Circuit = 5.13 %

ANEXO A – FORMATO DE DADOS MATPOWER

TABELA 1 – DADOS DO BUS (mpc.bus)		
Name	Column	Description
BUS I	1	bus number (positive integer)
BUS TYPE	2	bus type (1 = PQ, 2 = PV, 3 = ref, 4 = isolated)
PD	3	real power demand (MW)
QD	4	reactive power demand (MVar)
GS	5	shunt conductance (MW demanded at V = 1.0 p.u.)
BS	6	shunt susceptance (MVar injected at V = 1.0 p.u.)
BUS AREA	7	area number (positive integer)
VM	8	voltage magnitude (p.u.)
VA	9	voltage angle (degrees)
BASE KV	10	base voltage (kV)
ZONE	11	loss zone (positive integer)
VMAX	12	maximum voltage magnitude (p.u.)
VMIN	13	minimum voltage magnitude (p.u.)
LAM P	14	Lagrange multiplier on real power mismatch (u/MW)
LAM Q	15	Lagrange multiplier on reactive power mismatch (u/MVar)
MU VMAX	16	Kuhn-Tucker multiplier on upper voltage limit (u/p.u.)
MU VMIN	17	Kuhn-Tucker multiplier on lower voltage limit (u/p.u.)

TABELA 2 – DADOS DO GEN (mpc.gen)

Name	Column	Description
GEN BUS	1	bus number
PG	2	real power output (MW)
QG	3	reactive power output (MVar)
QMAX	4	maximum reactive power output (MVar)
QMIN	5	minimum reactive power output (MVar)
VG \pm	6	voltage magnitude setpoint (p.u.)
MBASE	7	total MVA base of machine, defaults to baseMVA
GEN STATUS	8	machine status,
PMAX	9	maximum real power output (MW)
PMIN	10	minimum real power output (MW)
PC1	11	lower real power output of PQ capability curve (MW)
PC2	12	upper real power output of PQ capability curve (MW)
QC1MIN	13	minimum reactive power output at PC1 (MVar)
QC1MAX	14	maximum reactive power output at PC1 (MVar)
QC2MIN	15	minimum reactive power output at PC2 (MVar)
QC2MAX	16	maximum reactive power output at PC2 (MVar)
RAMP AGC	17	ramp rate for load following/AGC (MW/min)
RAMP 10	18	ramp rate for 10 minute reserves (MW)
RAMP 30	19	ramp rate for 30 minute reserves (MW)
RAMP Q	20	ramp rate for reactive power (2 sec timescale) (MVar/min)
APF	21	area participation factor
MU PMAX	22	Kuhn-Tucker multiplier on upper Pg limit (u/MW)
MU PMIN	23	Kuhn-Tucker multiplier on lower Pg limit (u/MW)
MU QMAX	24	Kuhn-Tucker multiplier on upper Qg limit (u/MVar)
MU QMIN	25	Kuhn-Tucker multiplier on lower Qg limit (u/MVar)

TABELA 3 – DADOS DO BRANCH (mpc.branch)		
Name	Column	Description
F BUS	1	"from" bus number
T BUS	2	"to" bus number
BR R	3	resistance (p.u.)
BR X	4	reactance (p.u.)
BR B	5	total line charging susceptance (p.u.)
RATE A	6	MVA rating A (long term rating), set to 0 for unlimited
RATE B	7	MVA rating B (short term rating), set to 0 for unlimited
RATE C	8	MVA rating C (emergency rating), set to 0 for unlimited
TAP	9	transformer o nominal turns ratio, (taps at \from" bus,
SHIFT	10	transformer phase shift angle (degrees), positive) delay
BR STATUS	11	initial branch status, 1 = in-service, 0 = out-of-service
ANGMIN	12	minimum angle difference, $f \square t$ (degrees)
ANGMAX	13	maximum angle difference, $f \square t$ (degrees)
PF	14	real power injected at \from" bus end (MW)
QF	15	reactive power injected at \from" bus end (MVA _r)
PT	16	real power injected at \to" bus end (MW)
QT	17	reactive power injected at \to" bus end (MVA _r)
MU SF	18	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at \from" bus (u/MVA)
MU ST	19	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at \to" bus (u/MVA)
MU ANGMIN	20	Kuhn-Tucker multiplier lower angle difference limit (u/degree)
MU ANGMAX	21	Kuhn-Tucker multiplier upper angle difference limit (u/degree)

FONTE: Matpower 6.0 - User's Manual - December 16, 2016

ANEXO B – REDE 33 BARRAS MATPOWER

```

function mpc = case33bw
%CASE33BW Power flow data for 33 bus distribution system from Baran &
Wu
% Please see CASEFORMAT for details on the case file format.
%
% Data from ...
% M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in
distribution
% systems for loss reduction and load balancing," in IEEE
Transactions
% on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989.
% doi: 10.1109/61.25627
% URL: http://doi.org/10.1109/61.25627

%% MATPOWER Case Format : Version 2
mpc.version = '2';

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 100;

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone
Vmax Vmin
mpc.bus = [ %% (Pd and Qd are specified in kW & kVAr here, converted
to MW & MVar below)
1 3 0 0 0 0 1 1 0 12.66 1 1 1;
2 1 100 60 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
3 1 90 40 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
4 1 120 80 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
5 1 60 30 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
6 1 60 20 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
7 1 200 100 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
8 1 200 100 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
9 1 60 20 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
10 1 60 20 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
11 1 45 30 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
12 1 60 35 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
13 1 60 35 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
14 1 120 80 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
15 1 60 10 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
16 1 60 20 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
17 1 60 20 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
18 1 90 40 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
19 1 90 40 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
20 1 90 40 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
21 1 90 40 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
22 1 90 40 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
23 1 90 50 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
24 1 420 200 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
25 1 420 200 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
26 1 60 25 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
27 1 60 25 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
28 1 60 20 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
29 1 120 70 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
30 1 200 600 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
31 1 150 70 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;

```

```

32 1 210 100 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
33 1 60 40 0 0 1 1 0 12.66 1 1.1 0.9;
];

%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin
Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30
ramp_q apf
mpc.gen = [
1 0 0 10 -10 1 100 1 10 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0;
];

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle
status angmin angmax
mpc.branch = [ %% (r and x specified in ohms here, converted to p.u.
below)
1 2 0.0922 0.0470 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
2 3 0.4930 0.2511 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
3 4 0.3660 0.1864 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
4 5 0.3811 0.1941 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
5 6 0.8190 0.7070 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
6 7 0.1872 0.6188 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
7 8 0.7114 0.2351 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
8 9 1.0300 0.7400 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
9 10 1.0440 0.7400 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
10 11 0.1966 0.0650 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
11 12 0.3744 0.1238 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
12 13 1.4680 1.1550 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
13 14 0.5416 0.7129 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
14 15 0.5910 0.5260 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
15 16 0.7463 0.5450 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
16 17 1.2890 1.7210 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
17 18 0.7320 0.5740 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
2 19 0.1640 0.1565 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
19 20 1.5042 1.3554 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
20 21 0.4095 0.4784 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
21 22 0.7089 0.9373 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
3 23 0.4512 0.3083 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
23 24 0.8980 0.7091 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
24 25 0.8960 0.7011 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
6 26 0.2030 0.1034 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
26 27 0.2842 0.1447 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
27 28 1.0590 0.9337 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
28 29 0.8042 0.7006 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
29 30 0.5075 0.2585 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
30 31 0.9744 0.9630 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
31 32 0.3105 0.3619 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
32 33 0.3410 0.5302 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
21 8 2.0000 2.0000 0 0 0 0 0 0 0 -360 360;
9 15 2.0000 2.0000 0 0 0 0 0 0 0 -360 360;
12 22 2.0000 2.0000 0 0 0 0 0 0 0 -360 360;
18 33 0.5000 0.5000 0 0 0 0 0 0 0 -360 360;
25 29 0.5000 0.5000 0 0 0 0 0 0 0 -360 360;
];

%%----- OPF Data -----%%
%% generator cost data
% 1 startup shutdown n x1 y1 ... xn yn

```

```

% 2 startup shutdown n c(n-1) ... c0
mpc.gencost = [
    2 0 0 3 0 20 0;
];

%% convert branch impedances from Ohms to p.u.
[PQ, PV, REF, NONE, BUS_I, BUS_TYPE, PD, QD, GS, BS, BUS_AREA, VM, ...
    VA, BASE_KV, ZONE, VMAX, VMIN, LAM_P, LAM_Q, MU_VMAX, MU_VMIN] =
idx_bus;
[F_BUS, T_BUS, BR_R, BR_X, BR_B, RATE_A, RATE_B, RATE_C, ...
    TAP, SHIFT, BR_STATUS, PF, QF, PT, QT, MU_SF, MU_ST, ...
    ANGMIN, ANGMAX, MU_ANGMIN, MU_ANGMAX] = idx_brch;
Vbase = mpc.bus(1, BASE_KV) * 1e3; %% in Volts
Sbase = mpc.baseMVA * 1e6; %% in VA
mpc.branch(:, [BR_R BR_X]) = mpc.branch(:, [BR_R BR_X]) / (Vbase^2 /
Sbase);

%% convert loads from kW to MW
mpc.bus(:, [PD, QD]) = mpc.bus(:, [PD, QD]) / 1e3;

```